



**ТРАНСПОРТ ЗАРЯДОВ В ЭЛЕКТРОДЕ
ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА,
СОДЕРЖАЩЕМ УГЛЕРОДНЫЕ НАНОВОЛОКНА***

***А.О. Краснова^{1,2}, Н.В. Глебова², А.А. Нечитайлов²,
А.А. Томасов², Н.К. Зеленина²***

¹Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

д. 26, Московский проспект, Санкт-Петербург, 190013, Россия
тел.: +7 (812) 494-92-99, +7 (812) 712-77-91; e-mail: office@technolog.edu.ru

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
д. 26, ул. Политехническая, Санкт-Петербург, 194021, Россия
тел.: +7 (812) 297-22-45, +7 (812) 297-10-17; e-mail: post@mail.ioffe.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.19-21.040-051

Заключение совета рецензентов: 09.07.18 Заключение совета экспертов: 12.07.18 Принято к публикации: 16.07.18

Методами вольтамперных характеристик и спектроскопии электрохимического импеданса исследованы особенности переноса протонов и электронов в высокопористых электродах водородного топливного элемента, содержащих Nafion преимущественно в островковой форме, в широком диапазоне концентрации.

Электродные структуры изготавливались в два этапа: 1) механическое смешивание платинированной углеродной сажи типа Е-ТЕК, углеродных нановолокон типа Таунит МД (производство г. Тамбов) и водно-пропанольной дисперсии Nafion; 2) ультразвуковая гомогенизация для получения однородной дисперсии электродного материала. Далее полученную дисперсию наносили непосредственно на протонпроводящую мембрану типа Nafion-212. Количество исходных компонентов измеряли гравиметрически, компонентный состав электродного материала контролировали посредством термогравиметрического анализа. Структуру полученных материалов исследовали методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии.

Изготовленные электроды в составе мембранно-электродного блока активировали путем многократного циклического изменения разности потенциалов: от потенциала разомкнутой цепи до ~0 до стабилизации вольтамперных характеристик. Ионное сопротивление, определяемое сопротивлением переносу протонов, измеряли методом электрохимического импеданса в области высоких частот годографа и методом вольтамперных характеристик во влажном (активированном) электроде в составе мембранно-электродного блока. Электронное сопротивление измеряли в воздушно-сухом электроде, в котором ионное сопротивление сухого Nafion на несколько порядков больше электронного и практически не вносит вклад в измеренное сопротивление.

Установлено, что зависимость ионного сопротивления от содержания Nafion имеет минимум при 40 % масс. Электронное сопротивление линейно возрастает с увеличением содержания Nafion. Экстремальный характер зависимости ионного сопротивления от содержания Nafion объясняется снижением концентрации

*Краснова А.О., Глебова Н.В., Нечитайлов А.А., Томасов А.А., Зеленина Н.К. Транспорт зарядов в электроде водородного топливного элемента, содержащем углеродные нановолокна // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2018;19-21:40-51.

центров генерации воды (наночастиц платины) при увеличении содержания Nafion до некоторого практического значения, при котором вырабатываемой воды недостаточно для полного увлажнения Nafion.

Ключевые слова: водородный топливный элемент; катализатор; ионный транспорт; диффузия; протонпроводящий полимер; углеродные нановолокна; электровосстановление кислорода.

CHARGE TRANSFER IN HYDROGEN FUEL CELL ELECTRODE CONTAINING CARBON NANOFIBERS

A.O. Krasnova^{1,2}, N.V. Glebova², A.A. Nechitailov², A.A. Tomasov², N.K. Zelenina²

¹Saint-Petersburg State Institute of Technology
26 Moskovsky Av., St. Petersburg, 190013, Russia
tel.: +7 (812) 494 92 99, +7 (812) 712 77 91; e-mail: office@technolog.edu.ru
²Ioffe Institute
26 Polytehnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia
tel.: +7 (812) 297 22 45, +7 (812) 297 10 17; e-mail: post@mail.ioffe.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.19-21.040-051

Referred 9 July 2018 Received in revised form 12 July 2018 Accepted 16 July 2018

Using the methods of current-voltage characteristics and spectroscopy of electrochemical impedance, the paper studies the features of proton and electron transfer in high-porous electrodes of the hydrogen fuel cell containing Nafion mainly in insular form in a wide range of concentrations.

Electrode structures were manufactured in two steps: 1. Mechanical mixing of platinized carbon black of the E-TEK type, carbon nanofibers of the Taunit MD type (manufactured in Tambov) and the water-i-propanol dispersion of Nafion; 2. Ultrasonic homogenization to obtain a homogeneous dispersion of electrode material. The resulting dispersion was applied directly to a proton-conductive membrane of the Nafion-212 type. The quantities of the initial components were measured gravimetrically, the component composition of the electrode material was monitored by thermogravimetric analysis. The structure of the obtained materials was studied by the methods of scanning and transmission electron microscopy.

The given electrodes in the membrane-electrode assembly were activated by repeatedly cycling the potential difference from the potential of the open circuit to ~ 0 until the voltage-current characteristics stabilized. The ion resistance determined by the resistance to proton transfer was measured by the method of electrochemical impedance in the region of high frequencies of the hodograph and by the method of current-voltage characteristics in a wet (activated) electrode in the membrane-electrode assembly. The electronic resistance was measured in an air-dry electrode in which the ionic resistance of a dry Nafion was several orders of magnitude larger than the electron resistance and practically did not contribute to the value of the measured resistance.

The dependence of the ion resistance on the Nafion content is shown to have a minimum at 40% mass. The electronic resistance increases linearly with the increase in the Nafion content. The extreme nature of the dependence of the ion resistance on the Nafion content is explained by the decrease in the concentration of the water generation centers (platinum nanoparticles) with the increase in the Nafion content to some practical value at which the water produced is not sufficient to completely moisten Nafion.

Key words: hydrogen fuel cell; catalyst; ion transport; diffusion; proton-conducting polymer; carbon nanofibres; electroreduction of oxygen.



Анна Олеговна Краснова
Anna Krasnova

Сведения об авторе: аспирант, и.о. млад. науч. сотрудника в лаб. мощных полупроводниковых приборов, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН.

Образование: Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет) (2015 г.).

Область научных интересов: топливные элементы; электрохимические методы исследования; катализ.

Публикации: 11.

h-index: 2

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6709-5559>

Research Gate: 6.97

Information about the author: Ph.D. Student, Junior Researcher at Ioffe Institute.

Education: Master + Bachelor in Electrochemistry, St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), 2015.

Research interests: fuel cells; electrochemical methods of investigation; catalysis.

Publications: 11.

ResearcherID: M-3787-2015





Надежда Викторовна Глебова
Nadezhda Glebova

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Образование: СПбГТИ (ТУ) (2003 г.).

Область научных интересов: топливные элементы; нанокатализаторы; электрохимия.

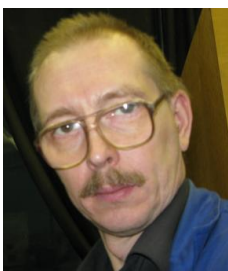
Публикации: 33, включая монографию.
h-index: 5.

Information about the author: Ph.D. in Physics and Mathematics, Researcher at Ioffe Institute.

Education: St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), 2003.

Research interests: fuel cell; nanocatalyst; electrochemistry.

Publications: 33, including a monograph.



Андрей Алексеевич Нечитайлов
Andrey Nechitailov

Сведения об авторе: д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Образование: ЛТИ (ТУ) (1983 г.).

Область научных интересов: аналитическая химия; физическая химия; топливные элементы; катализаторы.

Публикации: более 100.
h-index: 6.

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Senior Researcher at Ioffe Institute.

Education: LTI (TU), 1983.

Research interests: analytical chemistry; physical chemistry; fuel cells; catalysts.

Publications: more than 100.



Александр Александрович Томасов
Aleksandr Tomasov

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Образование: ЛПИ им. М.И. Калинина (СПбПУ) (1973 г.).

Область научных интересов: топливные элементы; нанокатализаторы; спектроскопия электрохимического импеданса.

Публикации: 72, включая монографию.
h-index: 6 (WoS), Scopus 4

Information about the author: Ph.D. in Physics and Mathematics, Senior Researcher at Ioffe Institute.

Education: LPI (SPbPU), 1973.

Research interests: fuel cell; nanocatalyst; electrochemical impedance spectroscopy.

Publications: 72, including a monograph.



Наталья Кирилловна Зеленина
Nataliya Zelenina

Сведения об авторе: науч. сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Образование: СПбГЭТУ (ЛЭТИ) (1979 г.).

Область научных интересов: топливные элементы; нанокатализаторы; метод вольтамперных характеристик.

Публикации: 51.
h-index: 5

Information about the author: Researcher at Ioffe Institute.

Education: SPbEU (LETI), 1979.

Research interests: fuel cell; nanocatalyst; method of current-voltage characteristics.

Publications: 51.

1. Введение

Эффективность кислородно-водородного топливного элемента в общем случае определяется характеристиками катода, на котором происходит реакция электровосстановления молекулярного кислорода [1]. Это связано с особенностями кинетики электровосстановления кислорода и электроокисления водорода на поверхности катализатора (обычно платина). В первом случае плотность тока обмена на поверхности платины на несколько порядков

меньше ($\sim 10^{-5}$ (4-электронный механизм), чем во втором ($\sim 10^{-1}$ А/см²) для условий, близких к нормальным [2–3]. Свойства катода в свою очередь определяются двумя ключевыми параметрами: электродной активностью и транспортными характеристиками [4]. Так, при наличии активного электрокатализатора, обеспечивающего высокую электродную активность, работу системы в целом будут ограничивать транспортные потери, которые складываются из диффузионных потерь потоков вещества и потерь, связанных с транспортом зарядов (протонов и элек-



тронов). В случае разработки или попыток усовершенствования катода перед исследователями встает задача привести все виды потерь к сопоставимым и минимальным значениям.

Одним из эффективных путей снижения диффузионных потерь в электроде является управление его структурой с целью создания оптимального сочетания транспортных (макро-) пор, обеспечивающих хорошую диффузию газов (в частности, кислорода и азота), и пор мезо- и нанометрового диапазона, обеспечивающих высокоразвитую поверхность активной составляющей электрокатализатора (в частности, платины). Для увеличения пористости и создания большого количества макропор можно использовать, например, введение в электрод углеродных наноструктурированных материалов: нанотрубок, нановолокон (УНВ), графеноподобных материалов, обладающих каркасной структурой с большим количеством пустот. Особенности структурирования и неко-

торые свойства таких электродных материалов и электродов исследованы в работах [5–9]. Снятие диффузионных ограничений катодного процесса в случае сильного увеличения пористости электрода даёт и отрицательный эффект, который заключается в увеличении резистивных потерь, связанных в основном с ионным транспортом. Управлять ионным сопротивлением можно путем изменения доли и морфологии протонпроводящего полимера Nafion в структуре электрода.

Определение зависимостей, связывающих резистивные потери при транспорте протонов с содержанием протонпроводящего компонента Nafion в электроде, в присутствии модификаторов пористости, позволяет управлять эффективностью катода. В данной работе впервые проведено комплексное исследование транспорта зарядов в высокопористых электродах, содержащих УНВ и имеющих островковую структуру Nafion.

Список обозначений

Буквы греческого алфавита

α	Коэффициент переноса
δ	Толщина электрода
η	Перенапряжение
τ	Кривизна пор
ω_i	Массовая доля i -го компонента
ω_v	Объемная доля Nafion

Буквы латинского алфавита

d_i	Плотность i -го компонента
i	Плотность тока
G	Масса электрода
P	Пористость (объемная доля пор) электрода
R	Сопротивление
Re	Измеренное ионное сопротивление (по импедансу)
V	Объем электрода

Индексы нижние

0	Обмен
A	Анод
C	Катод
i	компонент
конт.	контакт
мем.	Мембрана
расч.	Расчетная ВАХ
уд. H^+	Удельное ионное
уд. e^-	Удельное электронное
уд. Nafion	Удельное (сопротивление) влажного Nafion
экс.	Экспериментальная ВАХ

Аббревиатуры

ВАХ	Вольтамперная характеристика
МЭБ	Мембранно-электродный блок
ПЭМ	Просвечивающая электронная микроскопия
СЭМ	Сканирующая электронная микроскопия
УНВ	Углеродные нановолокна

2. Экспериментальная часть

2.1. Изготовление образцов

Для исследования была изготовлена серия образцов электродного материала системы Pt/C-УНВ-Nafion с фиксированным массовым отношением

Pt/C:УНВ = 1:1 и различным содержанием Nafion. На основе этих материалов изготовлены мембранно-электродные блоки (МЭБ) с симметричными по загрузке материала электродами. МЭБ были исследованы методами вольт-амперных характеристик (ВАХ) и электрохимического импеданса с целью

получения зависимости резистивных потерь от содержания Nafion. Кроме того, было измерено электронное сопротивление воздушно-сухих электродов двухэлектродным методом.

Использовали углеродные нановолокна типа Таунит МД (производство ООО «НаноТехЦентр», Тамбов), платинированную углеродную сажу с массовым содержанием платины 40 % (коммерческий продукт марки E-ТЕК) и коммерческий раствор Nafion.

Технологические операции приготовления дисперсии электродного материала для изготовления МЭБ 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, при этом отношение твердой фазы к жидкой в конечной дисперсии – в диапазоне 1:40 ÷ 1:80. Формирование электродов осуществляли способом, предусматривающим предварительное коагулирование Nafion из его раствора в жидкой фазе с последующим введением в структуру электрода [10]. 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 однородной (без видимых комочков) массы ~0,5 ч. Последующее ультразвуковое диспергирование проводили в ультразвуковой ванне типа Branson 3510 в течение 40 ÷ 100 часов до получения не расслаивающейся в течение минуты однородной дисперсии.

МЭБ 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 кислоты в течение 15 мин при температуре 70 ÷ 80 °С с последующей пятикратной промывкой водой. Электроды изготавливали методом намазывания дисперсии компонентов в смеси «изопропанол – вода» на протонпроводящую мембрану типа Nafion (марка МФ4-СК) толщиной 50 мкм. Мембрану термостатировали при 85 °С на плитке типа Ika C-MAG HP 7 с терморегулятором. Количество нанесенного материала контролировали гравиметрически.

Модифицирование пористой структуры осуществляли посредством введения в электрод на стадии приготовления углеродных нановолокон типа Таунит МД с каркасной структурой и высокой пористостью [11]. По данным производителя и данным авторов настоящей статьи, пористость составляет ~98 % (вычисления пористости этого материала делались на основании измерения насыпной плотности).

2.2. Аттестация образцов

Компонентный состав электродных материалов контролировали гравиметрически (методом термо-

гравиметрического анализа) на дериватографе METTLER TOLEDO типа TGA/DSC 1 STARESystem. Для этого навеску материала массой несколько миллиграмм помещали в алундовый тигель, который затем помещали в камеру дериватографа. Далее образец нагревали в интервале температур 35 ÷ 1 000 °С со скоростью 10 К/мин в воздушной среде. При этом регистрировали массовую и тепловую температурные зависимости. Для получения данных о компонентном составе, при обработке результатов ДТА использовали два подхода.

1. По убыли массы образца на характерных для каждого компонента температурных интервалах измеряли количество Nafion (260 ÷ 360 °С), углеродной сажи (360 ÷ 530 °С), УНВ (530 ÷ 700 °С). По массе остатка в конце эксперимента (1 000 °С) определяли количество платины. Ступени на массовой кривой соотносили с тепловыми эффектами (экзотермическими) на тепловой (дифференциальной термической) кривой для более четкого установления границ каждого процесса.

2. Количество сажи вычисляли исходя из оставшегося количества платины и состава платинированной сажи (40 % Pt, 60% C). Количество УНВ определяли по разности: убыль массы в интервале 360 ÷ 700 °С минус количество сажи, вычисленное по платине. Количество Nafion вычисляли с помощью метода, применявшегося в первом случае.

Оба подхода показали сопоставимые результаты, которые также хорошо согласовывались с составом по загрузке. Однако в первом случае происходило взаимное наложение температурных областей окисления углеродных материалов, что приводило к некоторому искажению результатов, поэтому за основу взяли второй метод.

Толщину электродов измеряли толщиномером с разрешением 0,5 мкм в 10 точках слоя. За результирующее значение толщины принимали среднее арифметическое. Площадь электродов составляла 1 см². Пористость электродов вычисляли исходя из известного компонентного состава, толщины и площади по соотношению (1):

$$P = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i * G}{V}, \quad (1)$$

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

2.3. Проведение измерений

Объемную долю Nafion находили исходя из его объема во влажном состоянии и объема электрода. При этом было установлено, что геометрические параметры электрода в сухом и во влажном состоянии



одинаковы в пределах погрешности измерений, то есть электрод имеет жесткую каркасную структуру.

Перед проведением электрохимических измерений МЭБ выдерживали в 0,5 М серной кислоты в течение 15 мин при температуре $70 \pm 80^\circ\text{C}$ с последующей пятикратной промывкой водой.

При проведении электрохимических измерений МЭБ помещали в стандартную электрохимическую ячейку (FC-05-02) с графитовыми токосъемными электродами производства ElectroChem, Inc.'s [12], схема которой приведена на рис. 1. ВАХ регистрировали при скорости развертки потенциала $0,010\text{ В/с}$ при комнатной температуре и атмосферном давлении. МЭБ предварительно активировали методом, описанным в работе [13].

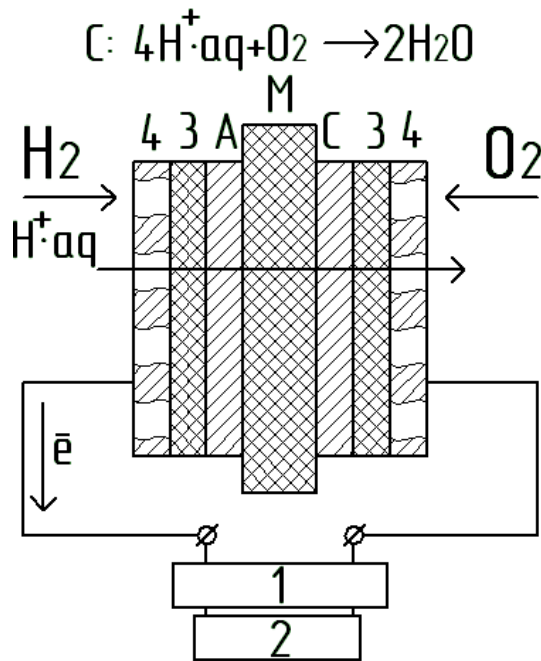


Рис. 1 – Схема измерительной электрохимической ячейки: С, А – пористые электроды, катод и анод соответственно; М – протонпроводящая мембрана типа Nafion; 1 – потенциостат; 2 – управляющий компьютер; 3, 4 – газораспределительные и газоподводящие каналы соответственно

Fig. 1 – Scheme of electrochemical cell: C, A - porous electrodes, cathode and anode respectively; M – proton-exchange membrane (Nafion type); 1 – potentiostat; 2 – control computer;

3, 4 – gas distribution and gas supply channels respectively

ВАХ регистрировали посредством потенциостата типа Р-150 (производство ООО «Элинс», Черноголовка); в среде кислород/водород при атмосферном давлении и температуре 23°C . Относительная влажность газов близка к 100 %.

При оценке удельного ионного сопротивления электрода из измеренного сопротивления МЭБ вычитали сопротивление контактов и мембраны, измеренное по высокочастотной отсечке годографа импеданса.

За действующую толщину принимали половину толщины электродов. Поскольку удельное сопротивление влажного Nafion [15] примерно на четыре порядка больше удельного сопротивления углеродной сажи, и эти компоненты находятся в электроде в измеримых количествах, ионное сопротивление электродов практически не входит в сопротивление МЭБ, полученное по высокочастотной отсечке годографа импеданса. Происходит шунтирование тока по углеродной саже. Эквивалентная электрическая схема МЭБ может быть описана как в работе [16].

Ионное сопротивление по ВАХ определяли следующим образом. По участку экспериментальной ВАХ, выражающему активационные потери (η в интервале $\sim 0 \div 0,25\text{ В}$, рис. 2), проводили подгонку параметров уравнения Батлера – Фольмера (до совпадения экспериментальной и расчетной кривой), строили расчетную полярограмму, свободную от резистивных и диффузионных потерь и отражающую сопротивление электрохимической реакции. При этом подгоночными параметрами являлись i_0 и α – плотность тока обмена и коэффициент переноса.

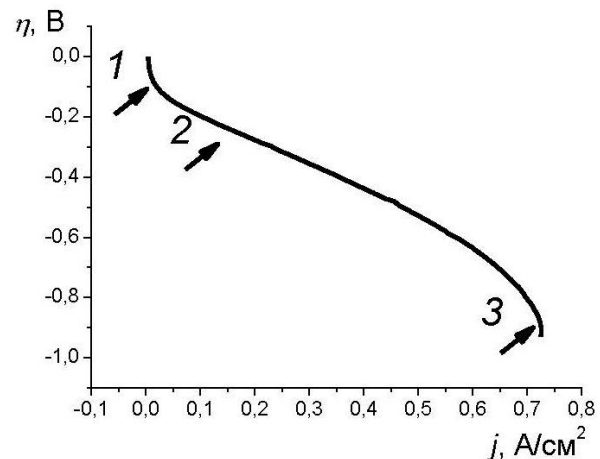


Рис. 2 – Типичная ВАХ МЭБ кислородно-водородного топливного элемента: 1 – участок активационных потерь; 2 – участок омического сопротивления; 3 – участок диффузионных потерь (загрузка Pt на катоде – 0,1 мг, ВАХ получены при комнатной температуре и атмосферном давлении в среде «водород – кислород»)

Fig. 2 – A typical VAC of the membrane-electrode assembly of the oxygen-hydrogen fuel cell: 1 – activation losses section; 2 – ohmic losses; 3 – section of diffusion losses (Pt loading at the cathode – 0.1 mg, VAC was obtained at room temperature and atmospheric pressure in hydrogen-oxygen medium)

Далее проводили численное дифференцирование расчетной и экспериментальной кривых в области линейного участка экспериментальной ВАХ. Сумму сопротивлений мембраны и контактов получали по высокочастотной отсечке годографа импеданса. Ионное сопротивление вычисляли по разности в соответствии с соотношением:

$$R_{H^+} = \frac{d\eta_{\text{экс.}}}{di} - \frac{d\eta_{\text{расч.}}}{di} - R_{\text{мем.}} - R_{\text{конт.}}, \quad (2)$$

где R_{H^+} – ионное сопротивление электродов; $\eta_{\text{экс.}}$ – перенапряжение экспериментальной ВАХ; $\eta_{\text{расч.}}$ – перенапряжение расчетной ВАХ; $R_{\text{мем.}}$ – сопротивление мембраны; i – плотность тока; $R_{\text{конт.}}$ – сопротивление контактов.

Для вычисления удельного ионного сопротивления электродов полученное значение R_{H^+} делили на половину суммарной толщины (δ) электродов (катода и анода):

$$R_{\text{уд.}H^+} = \frac{R_{H^+} * 2}{\delta_C + \delta_A}. \quad (3)$$

Спектры электрохимического импеданса регистрировали на приборе Z-500X с приставкой AX-500PL (производство ООО «Элинс», Черноголовка, Московская область; диапазон сопротивлений от 0,001 Ом до 1 МОм, погрешность измерения

сопротивления (0,001 ÷ 10 000) Ом соответственно в зависимости от диапазона измерений) в среде влажных газов (относительная влажность близка к 100 %) в системе азот/водород. Для измерения удельного ионного сопротивления электродов МЭБ методом электрохимического импеданса в высокочастотной области годографа применяли методику, описанную в [16–21]. При измерении ионного сопротивления по этим методам использовали эквивалентную электрическую схему из работы [15]. Проводили регистрирование годографа (типичный экспериментальный годограф показан на рис. 3). С помощью программы ZView2 проводили учет и коррекцию паразитной индуктивности ячейки в высокочастотной области годографа [22]. Линейный участок, который находится под углом, близким к 45° (34 ÷ 1,4 кГц), проецировали на ось реальной составляющей сопротивления. Проекция представляет собой 1/3 часть сопротивления электрода [19].

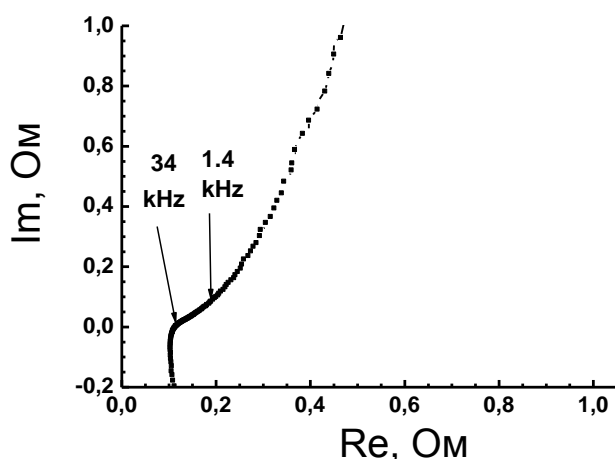


Рис. 3 – Типичный экспериментальный годограф электрохимического импеданса мембранно-электродного блока
 Fig. 3 – A typical experimental hodograph of the electrochemical impedance of a membrane electrode assembly

Удельное ионное сопротивление электрода вычисляли по соотношению:

$$R_{\text{уд.}H^+} = \frac{3 * Re}{\delta}, \quad (4)$$

где Re – измеренное ионное сопротивление; δ – толщина электрода.

Для микроскопических исследований электродную дисперсию испаряли в вакуумном испарителе при температуре ~70 °С. Оптимизацию аналитических измерений проводили в рамках подхода [23]. Перед съемкой порошкообразные образцы помещали на медные сетки диаметром 3 мм, которые закрепляли в спе-

циальном держателе. Структуру образцов исследовали в естественных условиях, чтобы исключить поверхностные эффекты от напыления проводящего слоя [24]. Микроструктуру образцов изучали методом сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии с полевой эмиссией (FE-STEM) на электронном микроскопе Hitachi SU8000. Съемку изображений вели в режиме регистрации прошедших электронов (режим светлого поля) при ускоряющем напряжении 30 кВ.

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 4 показаны СЭМ и ПЭМ изображения характерного участка электродного материала.

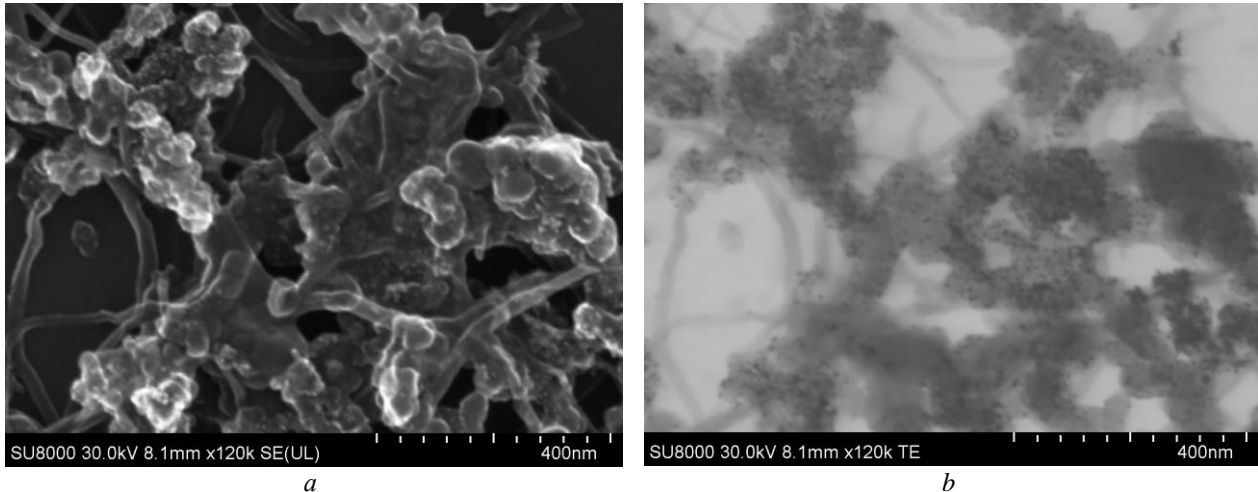


Рис. 4 – СЭМ (а) и ПЭМ (b) изображения характерной области электродного материала системы Pt/C-УНВ-Nafion
 Fig. 4 – SEM (a) and TEM (b) images of the characteristic region of the electrode material of the Pt/C-CNT-Nafion system

На рис. 4 различимы углеродные нановолокна в форме длинных нитей, наночастицы платины в виде темных точек на ПЭМ изображении и большая доля пор. Агломераты Nafion можно различить, сравнивая СЭМ и ПЭМ фотографии. В силу небольшого контраста, Nafion на ПЭМ изображении практически не виден, тогда как на СЭМ изображении он проявляет себя в виде бесформенных агломератов, оплетающих углеродные нановолокна. Пористость исследованных электродов находилась в диапазоне 68 ÷ 78 %.

В общем случае в композитном электроде водородного топливного элемента в сухом и влажном состоянии, как известно, заряды переносятся по-разному. В сухом электроде происходит перенос электронов по углеродному материалу и платине, поскольку протонпроводящий полимер Nafion в сухом состоянии имеет весьма высокое как ионное, так и электронное сопротивление. Во влажном состоянии имеет место смешанная проводимость, однако в случае обычно используемых составов электронное

и протонное сопротивление структуры различаются на ~4 порядка (электронное меньше, см. выше). Это обстоятельство позволяет, меняя влажность электрода, измерять разные составляющие его сопротивления. В функционирующем МЭБ, при протекании через него постоянного тока, резистивные потери обычно определяются протонной составляющей и могут быть оценены по наклону линейной части его вольтамперной характеристики [4, 25], где вклад активационных и диффузионных потерь невелик [4].

При исследовании транспорта зарядов в работающем МЭБ с электродами, содержащими Pt/C, УНВ и островковый Nafion, различными независимыми методами – методом электрохимического импеданса и методом вольтамперометрии, а также для воздушно-сухих электродов двухэлектродным методом (электронное сопротивление) – получены экспериментальные результаты (рис. 5). На рисунке каждой точке на графике соответствует один МЭБ (для $R_{уд}$ по ВАХ) или один электрод (для $R_{уд}$ по импедансу и $R_{уд,е^-}$).

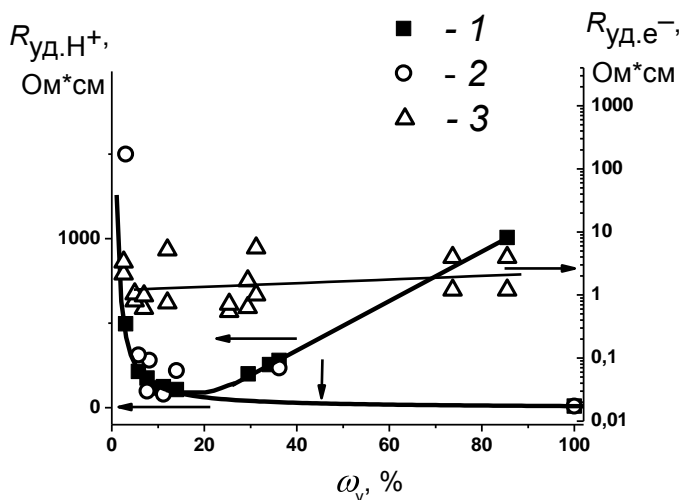


Рис. 5 – График зависимости удельного ионного сопротивления ($R_{уд, Н+}$) и удельного электронного сопротивления электродов ($R_{уд, е^-}$) от объемной доли Nafion (ω_v):
 1 – удельное сопротивление, вычисленное по ВАХ; 2 – удельное сопротивление, вычисленное методом электрохимического импеданса; 3 – удельное электронное сопротивление (сухой электрод); теоретическая кривая $R_{уд, Н+}(\omega_v)$ показана вертикальной стрелкой
 Fig. 5 – Dependence of the ion resistivity ($R_{уд, Н+}$) and the electronic resistivity of the electrodes ($R_{уд, е^-}$) on the volume fraction of Nafion (ω_v): 1 – the resistivity calculated from VAC; 2 – the resistivity calculated by the electrochemical impedance method; 3 – the electronic resistivity (dry electrode); the theoretical curve $R_{сп, Н+}(\omega_v)$ is shown by a vertical arrow



Расчетная зависимость (теоретическая кривая) удельного ионного сопротивления от содержания Nafion построена на основании следующих предположений. Поскольку сопротивление проводника (в данном случае Nafion) обратно пропорционально площади его сечения, и если принять его длину (в данном случае толщина электрода) неизменной, то уменьшение доли Nafion в электроде эквивалентно уменьшению площади сечения, и функция сопротивления от концентрации (объемной доли) ω_v с учетом кривизны пор τ в первом приближении будет иметь вид:

$$R_{уд.H^+} = \tau * R_{уд.Nafion} / \omega_v, \quad (5)$$

где $R_{уд.Nafion}$ – удельное сопротивление влажного Nafion.

Поскольку кривизна пор при увеличении доли Nafion до 1 также стремится к 1 (Nafion заполняет весь объем), и если принять линейность закона изменения кривизны пор с изменением доли Nafion, то зависимость (5) преобразуется следующим образом:

$$R_{уд.H^+} = R_{уд.Nafion} * 100 * (\tau / \omega_v - (\tau - 1) / 100), \quad (6)$$

где 100 – множитель перевода процентов в доли.

Полученная экспериментальная зависимость удельного ионного сопротивления пористых электродов от содержания Nafion, имеющего островковую структуру, для диапазона объемных содержаний Nafion 3 ÷ 15 об.%, отвечающего массовому содержанию Nafion 10 ÷ 40 %, соответствует расчетной зависимости. При этом значения удельного ионного сопротивления, полученные с помощью разных методов (ВАХ и электрохимического импеданса), сопоставимы.

При дальнейшем увеличении доли Nafion наблюдается положительное (в сторону больших значений) отклонение ионного сопротивления, полученного по ВАХ, от теоретической зависимости. Удельное электронное сопротивление электродов при этом остается существенно меньшим ионного, и не вносит значимого вклада в ионное сопротивление, полученное по ВАХ. Удельное электронное сопротивление варьируется случайным образом от 0,55 Ом·см до 5,6 Ом·см. Измеренное электронное сопротивление электродов примерно одинакового состава меняется в довольно широких пределах вследствие того, что при используемой двухэлектродной схеме высока случайная погрешность измерения, связанная с прижимными контактами.

Как видно на рис. 5, при увеличении содержания Nafion от 3 об.% до 86 об.% удельное электронное сопротивление растет незначительно (в 1,7 раза) и при больших содержаниях Nafion (86 об.%) остается на относительно низком уровне (~2 Ом·см), что указывает на отсутствие разрыва сплошности электропроводящей среды. Эти два обстоятельства свиде-

тельствуют о том, что при увеличении содержания Nafion происходит заполнение пустот внутри каркаса УНВ агломератами Nafion без существенного разрушения самого каркаса.

Удельное электронное сопротивление мембраны (чистого Nafion), измеренное двухэлектродным методом, равно 2 900 Ом·см. Полученное значение удельного электронного сопротивления Nafion существенно меньше табличных значений – $10^5 \div 10^6$ Ом·см [26]. Это может быть связано с тем, что измеряемый материал содержит влагу, равновесную с влажностью окружающего воздуха (исследовали воздушно-сухой Nafion).

Рост удельного ионного сопротивления, измеренного методом ВАХ, при больших содержаниях Nafion (см. рис. 5), кажущийся парадоксальным, может быть обусловлен неполным его использованием вследствие недостаточного увлажнения в процессе регистрирования ВАХ. Относительно небольшая доля платины в электроде и, соответственно, небольшая ее объемная концентрация (количество частиц платины в единичном объеме уменьшено) не обеспечивает необходимого количества воды для удержания всего слоя во влажном состоянии. Гидрофобность углеродной сажи и УНВ способствует выталкиванию воды. Можно предположить, что в электроде такого состава (с большой долей Nafion) появляются «мертвые области» более сухого Nafion, и общее ионное сопротивление электрода возрастает. В работающем МЭБ, при протекании через него ионного тока (это происходит при регистрации ВАХ), протоны увлекают за собой молекулы воды, выводя ее из зоны реакции. В случае регистрации годографа импеданса этого не происходит (измерения при малых поляризациях и плотностях тока) или происходит в меньшей степени.

4. Заключение

Получена и описана экспериментальная зависимость удельного ионного и электронного сопротивления новых структур электродов состава Pt/C – УНВ – островковый Nafion. Зависимость удельного ионного сопротивления, полученного методом ВАХ, в функционирующем электроде имеет минимум в районе 15 ÷ 20 об.% Nafion, что может соответствовать оптимальному содержанию иономера в данной системе и максимальной эффективности МЭБ.

Электронное сопротивление электрода даже при содержании Nafion 86 % остается на относительно низком уровне, что указывает на отсутствие разрыва сплошности электропроводящей среды и на отсутствие ограничений, связанных с транспортом электронов.

В функционирующих электродах наблюдается парадоксальная форма зависимости ионного сопротивления от содержания Nafion. Эта зависимость имеет экстремальный характер с минимумом в диа-

пазоне 15 ÷ 20 об.% Nafion (около 40 масс.%). При увеличении содержания Nafion выше 20 об.% ионное сопротивление растёт.

Экстремальный характер зависимости ионного сопротивления можно объяснить особенностями водного транспорта в функционирующем электроде, появлением плохо увлажнённых областей Nafion в результате малой объёмной доли центров генерации воды (платина) и уносом воды с гидратированными протонами.

При увеличении содержания Nafion от 3 об.% до 86 об.%, удельное электронное сопротивление растёт незначительно (в 1,7 раза) и при больших содержаниях Nafion (86 об.%) остается на относительно низком уровне (~2 Ом·см), что указывает на отсутствие разрыва сплошности электропроводящей среды. Эти два обстоятельства свидетельствуют о том, что при увеличении содержания Nafion происходит заполнение пустот внутри каркаса УНВ агломератами Nafion без существенного разрушения самого каркаса.

Количественный характер полученной зависимости ионного сопротивления от доли Nafion может меняться в зависимости от компонентного состава и структуры электрода.

Благодарности

Экспериментальные исследования выполнены при частичной финансовой поддержке программ: РФФИ № 16-08-00797, «УМНИК» №10854гу/2016, стипендии президента № СП-2407.2018.1. Авторы благодарят Отдел структурных исследований ИОХ РАН за исследование образцов методом электронной микроскопии.

Acknowledgments

Experimental studies were partially financial support by: RFBR No. 16-08-00797, "UMNIK" No. 10854gy/2016, President's scholarship No. SP-2407.2018.1. The authors are grateful to the Department of structural studies at the Institute of Organic Chemistry Russian Academy of Sciences for electron-microscopic analyses of our samples.

Список литературы

- [1] PEM Fuel cell testing and diagnosis / Zhang J. [et al.] – Elsevier, 2013. – 600 p.
- [2] Parthasarathy, A. Temperature dependence of the electrode kinetics of oxygen reduction at the platinum/Nafion interface – a microelectrode investigation / A. Parthasarathy [et al.] // J. Electrochem. Soc. – 1992. – Vol. 139. – No. 9. – P. 2530–2537.
- [3] Wagner, N. Electrochemical impedance spectra of solid-oxide fuel cells and polymer membrane fuel cells / N. Wagner [et al.] // Electrochim. Acta. – 1998. – Vol. 43. – P. 3785–93.
- [4] PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers: Fundamentals and Applications / Zhang J. – London: Springer, 2008. – 1137 p.
- [5] Глебова, Н.В. Катод водородного топливного элемента с модифицированными структурой и гидрофобностью / Н.В. Глебова [и др.] // ЖПХ. – 2015. – Т. 88. – Вып. 5. – С. 726–731.
- [6] Нечитайлов, А.А. Особенности массового транспорта на катоде водородного топливного элемента в присутствии УНТ / А.А. Нечитайлов [и др.] // ЖТФ. – 2015. – Т. 85. – Вып. 11. – С. 97–103.
- [7] Краснова, А.О. Технология и структурные характеристики электродного материала системы Pt/C-Taунит МД-Nafion / А.О. Краснова [и др.] // ЖПХ. – 2016. – Т. 89. – Вып. 6. – С. 756–761.
- [8] Глебова, Н.В. Особенности структурообразования и электрохимические характеристики катода водородного топливного элемента в присутствии гидрофобизатора и углеродных нанотрубок / Н.В. Глебова [и др.] // Электрохимия. – 2017. – Т. 53. – Вып. 2. – С. 227–232.
- [9] Краснова, А.О. Структурообразование в технологии электродного материала, содержащего наночастицы платины на углеродной саже, протонпроводящий полимер Nafion и терморасширенный графит / А.О. Краснова [и др.] // ЖПХ. – 2017. – Т. 90. – Вып. 3. – С. 299–306.
- [10] Litster S. PEM fuel cell electrodes / S. Litster, G. McLean // J. Power Sources. – 2004. – Vol. 130. – P. 61–76.
- [11] УНТ серии «Таунит» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nanotc.ru/index.php/productions/87-cnm-taunit> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 08.06.2018).
- [12] Fuel Cell [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fuelcell.com/product/fc-05-02/> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 08.06.2018).
- [13] Пат. 2487442 Российская Федерация, МПК H01M 8/04. Способ активации мембранно-электродного блока / Андроников Д.А., Зеленина Н.К., Терукова Е.Е., Томасов А.А.; заявитель и патентообладатель ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН – № 2012107563/07; опубл. 10.07.2013. Бюл. №19.
- [14] Sone, Y. Conductivity of Nafion 117 as Measured by a Four-Electrode AC Impedance Method / Y. Sone [et al.] // J. Electrochem. Soc. – 1996. – Vol. 143. – Issue 4. – P. 1254–1259.
- [15] Cooper, K.R. Electrical test methods for on-line fuel cell ohmic resistance measurement / K.R. Cooper, M. Smith // Journal of Power Sources. – 2006. – Vol. 160. – P. 1088–1095.
- [16] Lefebvre, M. C. Characterization of Ionic Conductivity Profiles within Proton Exchange Membrane Fuel Cell Gas Diffusion Electrodes by Impedance Spectroscopy / M. C. Lefebvre [et al.] // Electrochem. Solid-State Lett. – 1999. – Vol. 2. – Issue 6. – P. 259–261.
- [17] Cimentia, M. Investigation of Proton Transport in the Catalyst Layer of PEM Fuel Cells by Electrochemical Impedance Spectroscopy / M. Cimentia [et al.] // The Electrochemical Society. – 2010. – Vol. 28. – No. 23. – P. 147–157.
- [18] Jang, J. H. Complex capacitance analysis of ionic resistance and interfacial capacitance in PEMFC and DMFC catalyst layers / J. H. Jang [et al.] // Journal of Electrochemical Society. – 2009. – Vol. 156. – No. 11. – P. B1293–B1300.



[19] Jiang, R. Through-plane proton transport resistance of membrane and ohmic resistance distribution in fuel cells / R. Jiang [et al.] // *Journal of Electrochemical Society*. – 2009. – Vol. 156. – No. 12. – P. B1400–1446.

[20] Malevich, D. On the determination of PEM fuel cell catalyst layer resistance from impedance measurement in H₂/N₂ cells / D. Malevich [et al.] // *Journal of Electrochemical Society*. – 2012. – Vol. 159. – No. 12. – P. F888–F 895.

[21] Makharia, R. Measurement of Catalyst Layer Electrolyte Resistance in PEFCs Using Electrochemical Impedance Spectroscopy / R. Makharia [et al.] // *Journal of Electrochemical Society*. – 2005 – Vol. 152. – No. 5. – P. A970–A977.

[22] Cruz-Manzo, S. Inductive Effect on the Fuel Cell Cathode Impedance Spectrum at High Frequencies / S. Cruz-Manzo [et al.] // *Journal of Fuel Cell Science and Technology*. – 2012. – Vol. 9. – P. 051002-1–051002-8.

[23] Качала, В.В. Комплексное исследование структуры и механизмов получения и превращений газообразных, жидких и твердых химических систем методами масс-спектрометрии, спектроскопии ЯМР и электронной микроскопии / В.В. Качала [и др.] // *Успехи химии*. – 2013. – Т. 82. – С. 648–685.

[24] Кашин, А.С. Формирование наноразмерных покрытий и наночастиц металлов путем магнетронного распыления и их исследование методом сканирующей электронной микроскопии / А.С. Кашин, В.П. Анаников // *Изв. АН Сер. Хим.* – 2011. – № 12. – С. 2551–2556.

[25] Глебова, Н.В. Ионный транспорт в пористых электродах со смешанной проводимостью / Н.В. Глебова [и др.] // *ЖТФ* – 2017. – Т. 87. – Вып. 6. – С. 880–883.

[26] Shetzline, J.A. Quantifying Electronic and Ionic Conductivity Contributions in Carbon/Polyelectrolyte Composite Thin Films / J.A. Shetzline, S.E. Creager // *Journal of the electrochemical society*. – 2014. – Vol. 161. – No. 14. – P. H917–H923.

References

[1] Zhang J. et al. PEM Fuel cell testing and diagnosis. Elsevier, 2013; 600 p.

[2] Parthasarathy A. et al. Temperature dependence of the electrode kinetics of oxygen reduction at the platinum/Nafion interface – a microelectrode investigation. *J. Electrochem. Soc.*, 1992;139(9):2530–2537.

[3] Wagner N. et al. Electrochemical impedance spectra of solid-oxide fuel cells and polymer membrane fuel cells. *Electrochim. Acta*, 1998;43:3785–93.

[4] Zhang J. PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers: Fundamentals and Applications. London: Springer, 2008; 1137 p.

[5] Nechitailov A.A., Glebova N.V., Krasnova A.O., Tomasov A.A., Zelenina N. K. Cathode of hydrogen fuel cell, with modified structure and hydrophobicity. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2015;58(5):769–774.

[6] Nechitailov A.A., Glebova N.V., Krasnova A.O., Tomasov A.A., Zelenina N. K. Mass transport at the cathode of a hydrogen fuel cell in the presence of carbon nanotubes. *Technical Physics*, 2015;60(11):1670–1676.

[7] Krasnova A.O., Glebova N.V., Nechitailov A.A. Technology and structural characteristics of electrode material in the Pt/C-Taunite-MD–Nafion system. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2016;89(5):916–920.

[8] Glebova N.V., Nechitailov A.A., Krasnova A.O., Tomasov A.A., Zelenina N. K. Structure formation and electrochemical characteristics of the platinum-carbon cathode of the hydrogen fuel cell in the presence of a water repellent and carbon nanotubes. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2017;53(2):205–209.

[9] Krasnova A.O., Glebova N.V., Zhilina D.V., Nechitailov A.A. Structuring in the formation technology of electrode material based on Nafion proton-conducting polymer and thermally expanded graphite containing platinum nanoparticles on carbon black. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2017;90(3):361–368.

[10] Litster S., McLean G. PEM fuel cell electrodes. *J. Power Sources*, 2004;130:61–76.

[11] UNT “Taunit” [E-resource]. Access mode: <http://www.nanotc.ru/index.php/productions/87-cnm-taunit> – Title from the screen (06.08.2018) (in Russ.).

[12] Fuel Cell [E-resource] – Access mode: <http://fuelcell.com/product/fc-05-02/> (06.08.2018).

[13] Pat. 2487442 Russian Federation, IPC H01M 8/04 The method of activation of membrane-electrode assembly (Sposob aktivatsii membranno-elektrodnogo bloka) / Andronikov D.A., Zelenina N.K., Terukova E.E., Tomasov A.A.; Applicant and patent holder Ioffe institute – No. 2012107563/07; publ. 07/10/2013. Bul. no. 19 (in Russ.).

[14] Sone Y. et al. Conductivity of Nafion 117 as Measured by a Four-Electrode AC Impedance Method. *J. Electrochem. Soc.*, 1996;143(4):1254–1259.

[15] Cooper K.R., Smith M. Electrical test methods for on-line fuel cell ohmic resistance measurement. *Journal of Power Sources*, 2006;160:1088–1095.

[16] Lefebvre M.C., et al. Characterization of Ionic Conductivity Profiles within Proton Exchange Membrane Fuel Cell Gas Diffusion Electrodes by Impedance Spectroscopy. *Electrochem. Solid-State Lett.*, 1999;2(6):259–261.

[17] Cimentia M. et al. Investigation of Proton Transport in the Catalyst Layer of PEM Fuel Cells by Electrochemical Impedance Spectroscopy. *The Electrochemical Society*, 2010;28(23):147–157.

[18] Jang J.H. et al. Complex capacitance analysis of ionic resistance and interfacial capacitance in PEMFC and DMFC catalyst layers. *Journal of Electrochemical Society*, 2009;156(11):B1293–B1300.

[19] Jiang R. et al. Through-plane proton transport resistance of membrane and ohmic resistance distribution in fuel cells. *Journal of Electrochemical Society*, 2009;156(12):B1400–1446.

[20] Malevich D. et al. On the determination of PEM fuel cell catalyst layer resistance from impedance meas-



urement in H_2/N_2 cells. *Journal of Electrochemical Society*, 2012;159(12):F888–F895.

[21] Makharia R. et al. Measurement of Catalyst Layer Electrolyte Resistance in PEFCs Using Electrochemical Impedance Spectroscopy. *Journal of Electrochemical Society*, 2005;152(5):A970–A977.

[22] Cruz-Manzo S. et al. Inductive Effect on the Fuel Cell Cathode Impedance Spectrum at High Frequencies / S. Cruz-Manzo. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 2012;9:051002-1–051002-8.

[23] Kachala V.V., Khemchyan L.L., Kashin A.S., Orlov N.V., Grachev A.A., Zaleskiy S.S., Ananikov V.P. Target-oriented analysis of gaseous, liquid and solid chemical systems by mass spectrometry, nuclear mag-

netic resonance spectroscopy and electron microscopy. *Russ. Chem. Rev.*, 2013;82(7):648–685.

[24] Kashin A.S., Ananikov V.P. A SEM study of nanosized metal films and metal nanoparticles obtained by magnetron sputtering. *Russian Chemical Bulletin*, 2011;60(12):2602–2607.

[25] Glebova, N.V. Ion transport in porous electrodes with mixed conductivity. *Technical Physics*, 2017;62(6):895–898.

[26] Shetzline J.A., Creager S.E. Quantifying Electronic and Ionic Conductivity Contributions in Carbon/Polyelectrolyte Composite Thin Films. *Journal of the Electrochemical Society*, 2014;161(14):H917–H923.

Транслитерация по BSI



Пятая Всероссийская конференция с международным участием
«Топливные элементы и энергоустановки на их основе»

Суздаль, Владимирская область

С 17 по 21 июня 2018 г. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук (ИФТТ РАН) и Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химической физики Российской академии наук (ИПХФ РАН) провели Пятую Всероссийскую конференцию с международным участием «Топливные элементы и энергоустановки на их основе» и Вторую школу молодых ученых «Современные аспекты высокоэффективных топливных элементов и энергоустановок на их основе».

Всероссийские конференции «Топливные элементы и энергоустановки на их основе» являются местом обсуждения современного состояния и перспектив исследований в актуальной области физики твердого тела и физической химии – физики ионных проводников и материалов со смешанной ионно-электронной проводимостью. На конференции обсуждался широкий спектр фундаментальных проблем, включая: процессы переноса заряда и протекания окислительно-восстановительных реакций в электродах топливных элементов; получение и свойства новых материалов со смешанной ионно-электронной проводимостью; структура и свойства композиционных электродов; материалы интерконнекторов и защитные покрытия; импедансная спектроскопия; дизайн мембранно-электродных блоков; технологии изготовления топливных элементов и их характеристики; тонкопленочные технологии; разработка конструкции и масштабируемой лабораторной технологии изготовления батарей топливных элементов.

Темы конференции:

- Анионные проводники. Изготовление газоплотных пластин анионных проводников. Тонкопленочные технологии.
- Катодные материалы для ТОТЭ. Получение и свойства. Новые материалы со смешанной ионно-электронной проводимостью. Исследование самодиффузии анионов кислорода в материалах с ионно-электронной проводимостью.
- Анодные материалы для ТОТЭ. Структура и свойства композиционных анодов. Серотолерантные аноды.
- Процессы переноса заряда и протекания окислительно-восстановительных реакций на электродах топливных элементов. Изучение механизмов деградации и методы увеличения ресурса топливных элементов.
- Мембранно-электродные блоки. Технология нанесения многослойных электродов. Приготовление паст.
- Дизайн ячеек ТОТЭ. Технологии изготовления ячеек и их характеристики.
- Высокотемпературные клеи и герметики.
- Защитные покрытия. Отработка режимов нанесения. Длительные ресурсные испытания.
- Расчет конструкции и изготовление токовых коллекторов.
- Расчет конструкции стека, включая моделирование газораспределения, тепловыделения и упругих напряжений. Моделирование электрохимических процессов.
- Энергоустановки на ТОТЭ.
- Твердополимерные электролиты и мембраны. Новые материалы с высокой протонной проводимостью.
- Процессы переноса заряда в протонообменных мембранах, кроссовер водорода, кислорода и азота.
- Высокоэффективные катализаторы для водородно-воздушных топливных элементов. Катализаторы, толерантные к CO , катализаторы для окисления спиртов.
- Методы исследования материалов, компонентов единичных топливных элементов и стеков. Импедансная спектроскопия.
- Энергоустановки на топливных элементах с протонообменной мембраной.
- Топливные процессоры для производства синтез-газа. Конверсия спиртов и углеводов.
- Методы получения водорода и материалы для хранения водорода.
- Щелочные топливные элементы и ЭУ на их основе.
- Экономические оценки эффективности использования энергоустановок на базе топливных элементов и их себестоимости.
- Гибридные энергоустановки.

<http://www.issp.ac.ru/fuelcell2018/ru>

