

УСТРОЙСТВА И ИЗДЕЛИЯ НА ОСНОВЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

УДК 544.65; 544.47

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ ВЫСОКОЙ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ НА БАЗЕ ВОДОРОД-ВОЗДУШНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ОТКРЫТЫМ КАТОДОМ

© 2020 г. С. И. Нефедкин^{1,*}, В. Е. Гутерман², А. А. Алексеенко²,
С. В. Беленов², А. В. Иваненко¹, М. А. Климова¹, В. И. Павлов¹,
С. В. Панов¹, К. О. Паперж², С. В. Шубенков¹

¹ Компания “VMPower” (участник проекта “Сколково”), Москва, Россия

² ООО “Прометей РД” (участник проекта “Сколково”), Ростов-на-Дону, Россия

*E-mail: nefedkin@bmpower.ru

Поступила в редакцию 05.06.2020 г.

После доработки 10.08.2020 г.

Принята к публикации 13.08.2020 г.

Разработка энергосистем на базе водород-воздушных топливных элементов высокой удельной мощности с использованием отечественных наноструктурных материалов и технологий является актуальной задачей. Представлены технологии изготовления полимерных топливных элементов российской компании “VMPower” с применением Pt/C-электрокатализаторов серии РМ производства другой российской компании – “Прометей РД”. Показано, что по своим функциональным характеристикам катализаторы серии РМ превосходят импортные аналоги. Применение катализатора РМ40, а также других инновационных решений в области нанотехнологий (наноструктурированные покрытия биполярных пластин, формирование иономера на каталитическом слое) позволило достичь в энергетическом модуле топливного элемента с твердым полимерным электролитом с воздушным охлаждением удельной мощности более 1 кВт/кг.

DOI: 10.1134/S1992722320030097

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие энергоустановки на водород-воздушных топливных элементах с твердым полимерным электролитом (ТЭ ТПЭ) доминируют среди других типов ТЭ и активно выходят на рынок источников энергии для автономных устройств и транспортных средств [1]. Такие энергоустановки в режиме номинальной нагрузки имеют КПД около 50%, однако при частичной нагрузке он может достигать 70% и более. Энергетический модуль с воздушным охлаждением позволяет развивать удельную мощность в реальных условиях работы беспилотного летательного аппарата (БПЛА) свыше 1 кВт/кг, при этом удельная энергия на единицу массы энергосистемы на борту БПЛА может достигать 700 Вт ч/кг. Это в 4–5 раз выше, чем у литий-ионных аккумуляторов (при высокой токоотдаче) на борту тех же БПЛА. В реальных условиях энергоемкость литий-ионных аккумуляторов с учетом их неполного разряда, тепловых потерь при больших токах составляет лишь 140–160 Вт ч/кг. Поэтому использование энергетической системы на основе ТЭ ТПЭ

позволяет увеличить дальность полета БПЛА в 3–5 раз, что соответствует по дальности БПЛА, оснащенным двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Однако в отличие от ДВС, энергетические системы на основе ТЭ ТПЭ показывают более высокий КПД, не имеют вредных выбросов, показывают низкие уровни шума и вибраций, что важно для обеспечения скрытности полета БПЛА и более качественной фото- и аэросъемки [2–6]. Высокие удельные характеристики достигнуты за счет повышения удельной мощности самого энергетического модуля, снижения массы компонентов энергосистемы. Здесь не используются массивные биполярные пластины, увлажнители, обогреватели, радиаторы и другие элементы, которые обычно применяют в автомобильных энергоустановках на базе ТЭ ТПЭ с закрытым катодом и жидкостным охлаждением. В настоящей работе реализована упрощенная схема энергосистемы, в которой водород из баллона высокого давления через редуктор подается в анодную полость ТЭ, а нагнетатель прокачивает воздух через гофрированные биполярные пластины к катодам. Таким образом отводится теплота, выделяю-

щаяся при работе ТЭ ТПЭ, подается кислород и с увлажненным воздухом отводится реакционная вода [2–6].

Высокая удельная мощность единичного ТЭ достигается:

- инновационной технологией формирования полимерного электролита и каталитических слоев, которая обеспечивает высокую протонную проводимость, самоувлажнение электролита и каталитических слоев только реакционной водой;

- высокой активностью каталитического слоя. Этот параметр в первую очередь определяется активностью катализатора РМ40;

- использованием легких биполярных пластин с низкоомным коррозионностойким покрытием для эффективной электрической коммутации ТЭ в энергетическом модуле.

В данной работе наряду с решением задачи по разработке энергосистемы ТЭ ТПЭ представлено успешное решение одной из самых сложных задач – изготовление высокоактивных наноструктурных электрокатализаторов, не уступающих или даже превосходящих известные зарубежные образцы. Учитывая наличие производственных секретов (*know-how*), используемых при синтезе катализаторов, акцент в работе сделан на их характеристики с помощью современных методов исследования и анализа, а также на результатах испытаний в электрохимических ячейках и реальных энергосистемах ТЭ ТПЭ с прямой подачей воздуха.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Наноструктурные Pt/C-электрокатализаторы серии РМ получены методами жидкофазного синтеза по оригинальной технологии ООО “Прометей РД”, находящейся в режиме *know-how*. В качестве углеродного носителя при приготовлении катализаторов, содержащих 20–40 мас. % Pt, использована углеродная сажа Vulcan XC72 (Cabot Co.), для катализатора с загрузкой платины 60 мас. % – Ketjenblack EC 300J.

Массовую долю платины в образцах определяли методом гравиметрии по массе остатка, не сгоревшего при нагревании до 800°C. При этом принимали во внимание, что сам углеродный носитель сгорает без остатка.

Порошковые дифрактограммы металлуглеродных материалов регистрировали на автоматическом дифрактометре ARL X'TRA с использованием CuK_α -излучения ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$). Измерения проводили при комнатной температуре. Образцы тщательно перемешивали и помещали в кювету глубиной 1.5 мм или на бесфоновую подложку. Съемку проводили в интервале углов 15–55 градус с шагом 0.02 градус и скоростью от 8 до 0.5 граду-

сов в минуту в зависимости от поставленной задачи. Средний размер кристаллитов металлической фазы рассчитывали по уравнению Шеррера для наиболее интенсивного пика (111), как описано в [7].

Анализ структуры катализаторов методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) проводили с использованием микроскопа JEM-2100 (JEOL, Япония), работающего при ускоряющем напряжении 200 кВ. Для подготовки образцов к исследованию порошок электрокатализатора (0.5 мг) помещали в 1 мл гептана и диспергировали ультразвуком для получения однородной суспензии, одну каплю которой осаждали на распылительной решетке из меди, покрытой углеродом.

Для изучения электрохимического поведения катализаторов использовали трехэлектродную электрохимическую ячейку. В качестве рабочего электрода использовали торец армированного в тефлон стеклографитового цилиндра с нанесенным тонким слоем Pt/C. В качестве вспомогательного – Pt-проволоку, в качестве электрода сравнения – Ag/AgCl-электрод. Рабочий электролит – 0.1 М раствор HClO_4 , насыщенный аргоном (при измерении циклических вольтамперограмм (ЦВА)) или кислородом (при определении активности катализаторов в реакции восстановления кислорода (РВК)). Все значения потенциалов в работе приведены относительно обратимого водородного электрода (ОВЭ).

Площадь электрохимически активной поверхности (ЭХАП) платины определяли методом ЦВА на неподвижном электроде. Для подготовки рабочего электрода применяли суспензию (каталитические чернила) исследуемых Pt/C-материалов. При приготовлении чернил навеску катализатора массой 6 мг помещали в смесь 900 мкл изопропанола и 100 мкл водной эмульсии полимера Nafion® 0.5%. Затем суспензию перемешивали на механической магнитной мешалке и подвергали диспергированию в ультразвуковой ванне. Аликвоту чернил объемом 6 мкл наносили на стеклографитовый торец отполированного и обезжиренного вращающегося дискового электрода (ВДЭ) площадью 0.196 см², контролируя вес капли. Первоначально для стандартизации поверхности регистрировали 100 циклических вольтамперограмм в диапазоне потенциалов 0.04–1.2 В при скорости развертки потенциала 200 мВ/с. Далее регистрировали две циклические вольтамперограммы при скорости развертки потенциала 20 мВ/с. Электрохимически активную поверхность рассчитывали по полусумме количеств электричества, затраченных на электрохимическую десорбцию и адсорбцию водорода, используя вольтамперограмму второго цикла, как описано в [8].

Активность катализатора в РВК определяли методом вольтамперометрии на вращающемся дисковом электроде в диапазоне потенциалов от 0.04 до 1.2 В. Электролит (0.1 М HClO_4) насыщали кислородом в течение 60 мин, после чего измеряли вольтамперограммы при развертке потенциала в сторону более высоких значений со скоростью 20 мВ/с при различных скоростях вращения (400, 900, 1600, 2500 об./мин) дискового электрода. Для учета вклада омического падения потенциала и процессов, не связанных с РВК, вольтамперограммы, полученные при развертке потенциала в сторону более положительных значений, нормализовали по общепринятым методикам [9, 10]. Для этого потенциал исследуемого электрода уточняли по формуле $E = E_{\text{изм}} - I_t \cdot R$, где $E_{\text{изм}}$ – задаваемое значение потенциала, $I_t \cdot R$ – омическое падение потенциала, равное произведению силы тока на сопротивление R -слоя раствора между электродом сравнения и исследуемым электродом, которое составляло в данном случае 23 Ом. Такая величина сопротивления соответствует данным [10]. Учет вклада процессов, протекающих на электроде в обескислороженном растворе (атмосфера Ar), проводили, вычитая из вольтамперограммы аналогичную кривую, зарегистрированную при проведении измерений в атмосфере Ar: $(I(\text{O}_2) - I(\text{Ar}))$, как описано в [11]. Каталитическую активность катализаторов в РВК (кинетический ток) определяли по нормализованным вольтамперограммам с учетом вклада массопереноса в условиях ВДЭ [11]. Расчет кинетического тока проводили по уравнению Коутетского–Левича:

$$1/j = 1/j_k + 1/j_d,$$

где j – экспериментально измеряемый ток, j_d – диффузионный ток, j_k – кинетический ток. Расчет значений кинетических токов проводили для потенциала 0.90 В (ОВЭ).

Для оценки стабильности электрокатализаторов применяли метод ЦВА (5000 циклов) в диапазоне потенциалов 0.6–1.0 В со скоростью развертки потенциала 100 мВ/с. Подобная методика позволяет диагностировать различия в стабильности платиносодержащих катализаторов, что подтверждается, например, результатами работ [8, 12]. Циклирование проводили в атмосфере аргона. После каждых 500 циклов регистрировали две циклические вольтамперограммы при скорости развертки потенциала 20 мВ/с в диапазоне потенциалов 0.04–1.2 В, по водородной области которых рассчитывали ЭХАП. Оценка деградации материала проводили не только по изменению ЭХАП, как это было сделано в [8, 12], но и путем сравнения значений кинетических токов в РВК до и после стресс-теста.

Испытания электрокатализаторов в мембранно-электродном блоке (МЭБ) водород-воздушного ТЭ проводили следующим образом. Диспергируя электрокатализатор и эмульсию Nafion (DE-1021, 10 мас. %) (массовое соотношение Nafion/Углерод = 0.7) в смеси вода/изопропанол, готовили каталитические чернила, которые затем наносили на газодиффузионный слой Freudenberg. Для формирования катодного и анодного слоев наносили исследуемый катализатор в количестве, необходимом для достижения загрузки платины 0.4 мг/см². Сборку МЭБ проводили на воздухе. Прессование осуществляли в течение трех минут при $T = 130^\circ\text{C}$ и $P = 80$ атм/см². Тестирование МЭБ проводили в ячейке “Electrochem” с активной областью 1 см² на станции GreenLight Innovation G40 (водород/воздух, скорость потока водорода 0.1 л/мин, воздуха – 0.4 л/мин, увлажнение газов 100%, $T = 20^\circ\text{C}$). Для регистрации циклических вольтамперограмм использовали потенциостат Elins P40X, время съемки одной вольтамперограммы – 13 мин. Активность Pt/C-образцов серии PM (ООО “Прометей РД”) сравнивали с параметрами коммерческих Pt/C-электрокатализаторов HiSPEC3000 (Johnson Matthey, 20% мас. Pt) и E-TEK 40 (E-tek, 40 мас. % Pt).

Для испытания разработанного катализатора в энергетическом модуле его наносили на поверхность микропористого слоя газодиффузионного электрода Freudenberg H24C3. Для нанесения использовали метод последнего ультразвукового распыления каталитических чернил, содержащих катализатор, а также одностадийный процесс шелкотрафаретной печати из каталитической пасты. После нанесения катализаторов на газодиффузионный слой методом горячего прессования формировали топливную ячейку с активной поверхностью 54 см². Энергетический модуль ТЭ ТПТЭ для испытания катализаторов состоял из 96 топливных элементов, которые коммутировали через биполярный элемент VMpower на основе гофрированной фольги титана с защитным покрытием и стягивали концевыми плитами с помощью шпилек. Воздух подавался нагнетателем, установленным на выходе батареи (вытягивание воздуха). Определение вольтамперных и ресурсных характеристик энергетического модуля проводили на специализированном стенде при контролируемой подаче водорода чистотой 99.995% с избыточным давлением 0.4–0.5 бар. Электрическое управление и измерения проводили с помощью электронной нагрузки АСТАСОМ EA-EL 9200-420 В.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наноструктурные катализаторы PM20, PM30, PM40 и PM60, содержащие от 20 до 60 мас. % Pt

Таблица 1. Структурные характеристики Pt/C-электрокатализаторов

Образец	Массовая доля Pt в катализаторах, ω(Pt), %	Средний размер кристаллитов Pt, $D_{ср}$, нм (РФА)	Средний размер наночастиц платины, $D_{ср}$, нм (ПЭМ)
P20	20	2.2	3.1
P30	30	2.9	2.9
P40	40	2.1	3.1
P60	60	4.0	3.9
HiSPEC 3000	20	2.3	2.0–2.5 [14, 15]
E-ТЕК 40	40	3.7	3.2–3.7 [16, 17]

Таблица 2. Некоторые параметры, характеризующие электрохимическое поведение Pt/C-электрокатализаторов

Образец	ЭХАП, $m^2/g(Pt)$	I_k , А при 0.90 В	I_k , А/г(Pt) при 0.90 В	$E_{1/2}$, В	Относительная стабильность, % (5000 циклов, 0.6–1.0 В)
PM20	120	1.9	250	0.92	86
PM30	98	2.1	208	0.92	86
PM40	88	2.5	186	0.94	86
HiSPEC3000	84	1.3	182	0.91	82
E-ТЕК 40	42	1.4	134	0.89	

(табл. 1), представляют собой наночастицы платины, соответственно распределенные на поверхности и в порах частиц углеродных носителей.

По результатам рентгеновской дифрактометрии электрокатализаторы серии PM характеризуются средним размером кристаллитов платины от 2.1 до 4.0 нм, исследованные коммерческие аналоги – около 2 нм (HiSPEC3000) и 4 нм (E-ТЕК 40) (табл. 2). Наибольший размер кристаллитов – около 4.0 нм – характерен для материалов с наибольшей загрузкой платины PM60 (60 мас. % Pt) и E-ТЕК 40 (40 мас. % Pt), на рентгенограммах ко-

торых наблюдается высокий и относительно узкий по сравнению с другими материалами максимум 111 платины при значении угла 2θ около 40 градусов (рис. 1).

Значения средних размеров наночастиц, определенные по ПЭМ-изображениям, в целом согласуются с результатами расчета размера кристаллитов по уравнению Шеррера (табл. 1). Для всех образцов серии PM характерно равномерное распределение наночастиц платины по поверхности углеродного носителя (рис. 2). На фотографиях всех образцов можно отметить наличие неболь-

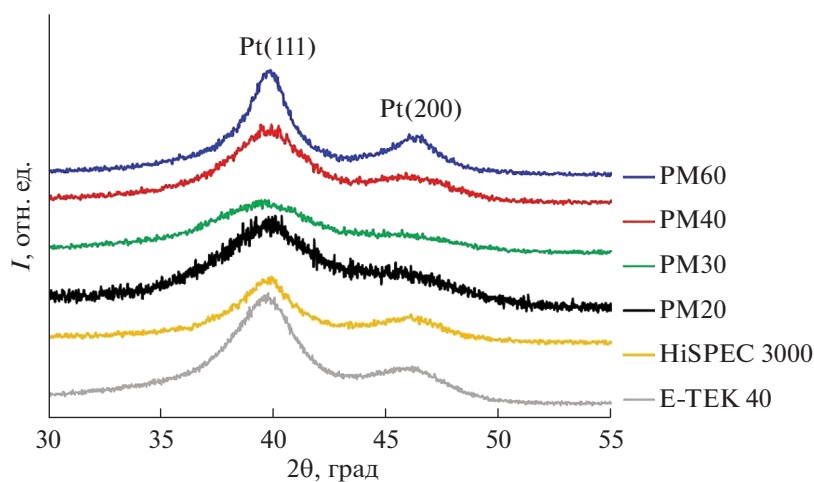


Рис. 1. Рентгенограммы Pt/C-электрокатализаторов серии PM и импортных аналогов.

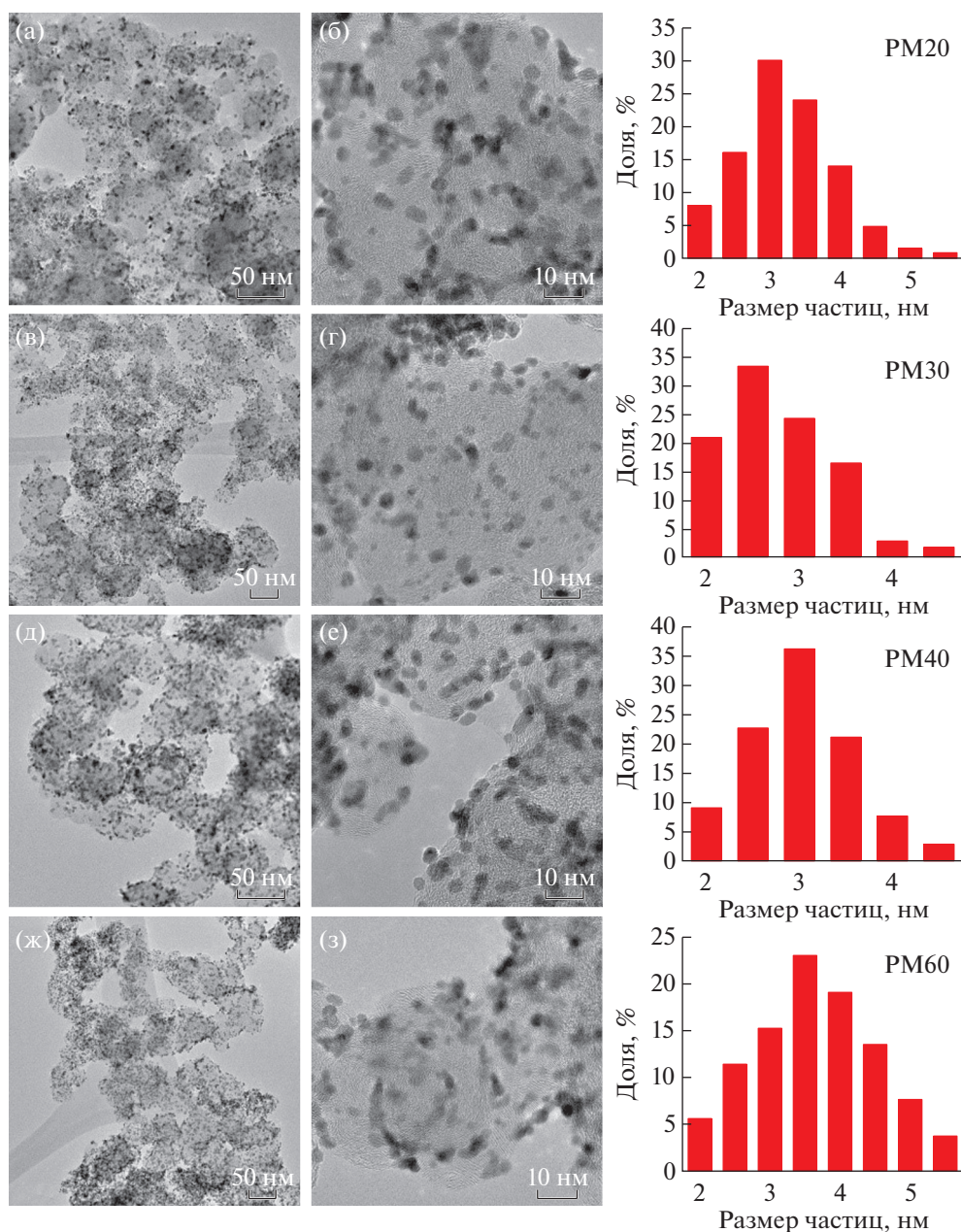


Рис. 2. ПЭМ-изображения Pt/C-материалов и гистограммы распределения наночастиц по размеру: PM20 (а, б), PM30 (в, г), PM40 (д, е), PM60 (ж, з).

шого количества агрегатов размером около 4–5.5 нм (рис. 2).

Известно, что увеличение содержания платины в катализаторах, как правило, приводит к уменьшению среднего расстояния между наночастицами, что повышает вероятность их коалесценции и, как следствие, обуславливает увеличение среднего размера частиц [13]. Среди исследуемых электрокатализаторов наибольшим размером наночастиц и, как было отмечено, кристаллитов платины характеризуются образцы с

высокой загрузкой металла: PM60 (60 мас. % Pt) и E-TEC 40 (40 мас. % Pt) (рис. 2, табл. 1).

Типичные циклические вольтамперограммы исследованных образцов представлены на рис. 3. Практически во всем диапазоне потенциалов токи на катодной и анодной ветвях циклических вольтамперограмм в расчете на единицу массы платины увеличиваются в ряду: E-TEC 40 \ll PM40 < PM30 \approx HiSPEC 3000 < PM20. Катализаторы серии PM показывают более высокие значения ЭХАП, чем импортные аналоги с тем же содержанием платины (табл. 2).

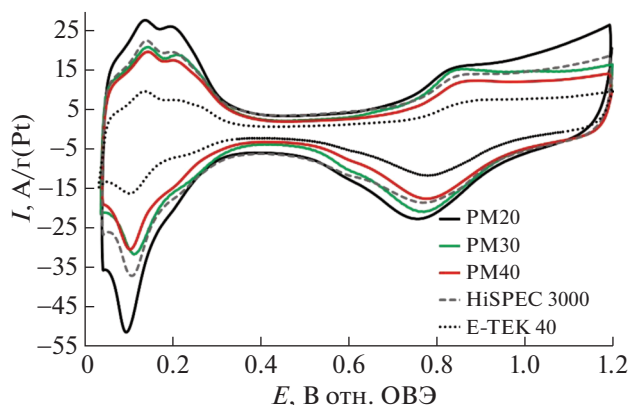


Рис. 3. Циклические вольтамперограммы Pt/C-катализаторов. Второй цикл. Скорость развертки потенциала 20 мВ/с, электролит – 0.1 М раствор HClO_4 , насыщенный аргонном.

Судя по результатам рентгенофазового анализа (РФА) и ПЭМ, представленным на рис. 1, 2 и в табл. 1, высокие значения ЭХАП обусловлены не столько малым размером наночастиц платины, сколько равномерностью их пространственного

распределения (слабой агрегацией частиц) и высокой доступностью по отношению к электролиту и реагенту.

По-видимому, позитивные особенности структуры катализаторов серии РМ обусловлены использованием методов коллоидной химии в технологии их синтеза, разработанной в ООО “Прометей РД”.

Каталитическую активность Pt/C-катализаторов¹ определяли методом вольтамперометрии на ВДЭ, регистрируя серию кривых при скоростях вращения электрода 400, 900, 1600 и 2500 об./мин. На основе этих кривых (рис. 4а, 4б) проводили анализ зависимости тока при потенциале 0.90 В от скорости вращения дискового электрода в координатах Коутецкого–Левича (рис. 4в). Это позволило определить значения кинетических параметров РВК и сравнить активности исследуемых катализаторов (табл. 2).

¹ Электродкатализатор с высокой загрузкой платины РМ60 требует подбора оптимального состава каталитических чернил и другого соотношения Nafion/углеродный носитель, нежели РМ20–РМ40 [18]. Изучение электрохимического поведения этого катализатора не проводили.

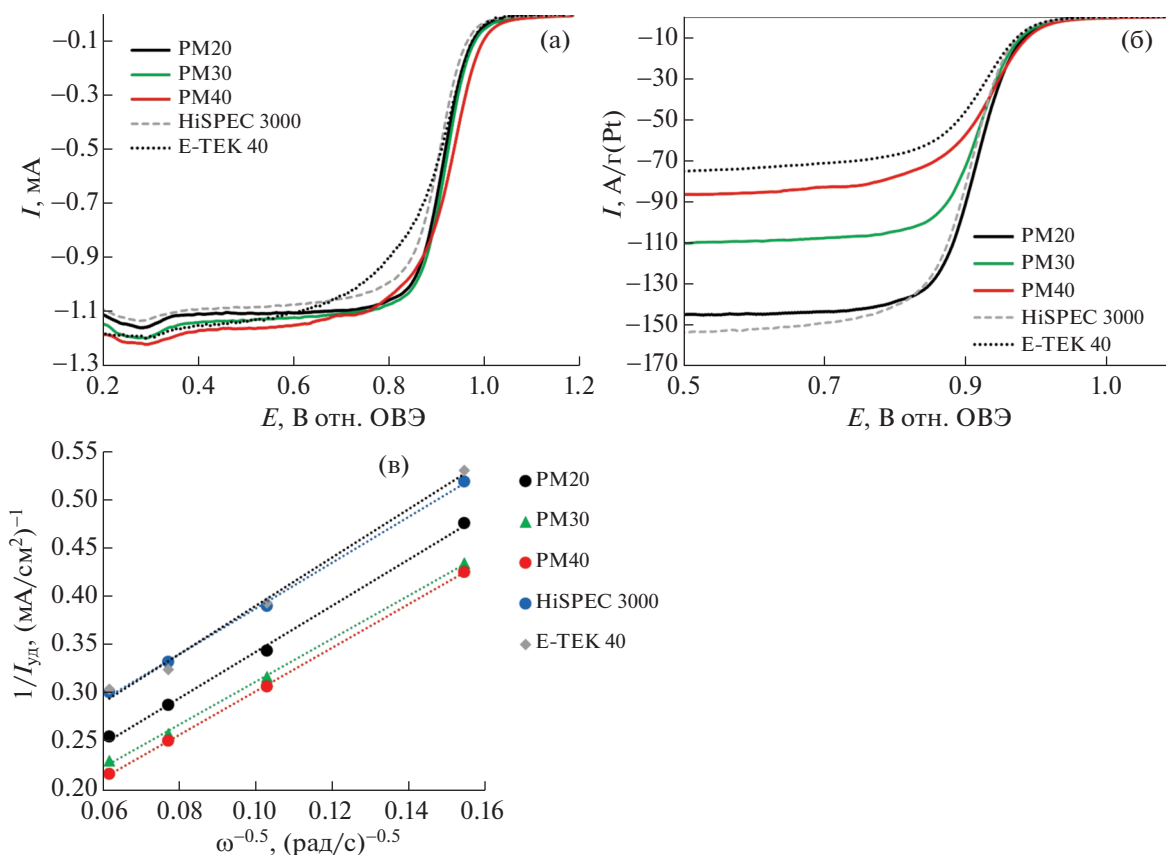


Рис. 4. Вольтамперограммы электровосстановления кислорода на разных электрокатализаторах при скорости вращения 1600 об./мин (а, б) и зависимость силы тока от скорости вращения дискового электрода в координатах Коутецкого–Левича (в). Скорость развертки потенциала 20 мВ/с, электролит – 0.1 М раствор HClO_4 , насыщенный кислородом.

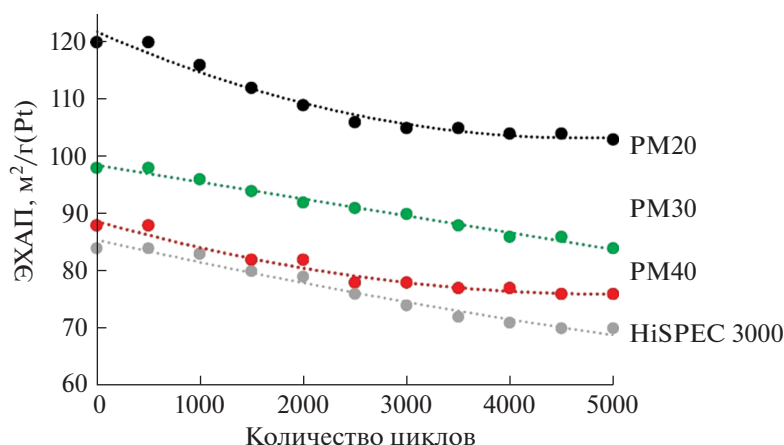


Рис. 5. Изменение площади электрохимически активной поверхности Pt в ходе стресс-тестирования катализаторов (5000 циклов в диапазоне 0.6–1.0 В).

По увеличению масс-активности в РВК и потенциала полуволны РВК исследованные катализаторы, соответственно, соответственно располагаются в ряды: E-ТЕК 40 \ll HiSPEC 3000 \approx \approx PM40 < PM30 < PM20 и E-ТЕК 40 < HiSPEC 3000 < PM30 = PM20 < PM40 (табл. 2). Таким образом, активность катализаторов серии РМ в РВК превышает активность зарубежных аналогов.

Стресс-тестирование Pt/C-катализаторов (5000 циклов в диапазоне потенциалов 0.6–1.0 В) показало их высокую стабильность (рис. 5, табл. 2). Важно, что относительная стабильность катализаторов серии РМ20–РМ40 не зависит от содержания в них металла и несколько превышает стабильность зарубежных аналогов². Высокие значения исходной ЭХАП, масс-активности и стабильности катализаторов РМ подтвердили перспективность их использования при конструировании МЭБ водород-воздушных топливных элементов.

Известно, что эффективность применения платиносодержащих катализаторов в МЭБ твердотопливных элементов далеко не всегда коррелирует с их поведением в электрохимической ячейке, так как условия функционирования катализатора в МЭБ существенно отличаются от таковых для полуэлемента с жидким электролитом [19–21]. В частности, в каталитическом слое МЭБ существенно меняются условия подвода реагентов и отвода продуктов к/от наночастиц платины; важную роль играет влажность подводимых газов, скорость их подвода, особенности распределения протонпроводящего иономера в каталитическом слое и т.д. С точки зрения оптимизации массовой доли платины в электро-

катализаторе, состава и толщины каталитического слоя наиболее широко при конструировании МЭБ используются электрокатализаторы с 40%-ной загрузкой платины при содержании драгоценного металла в количестве 0.2–0.4 мг/см² геометрической поверхности мембраны [21]. С учетом изложенного выше для проведения испытаний в МЭБ из серии катализаторов РМ был выбран образец РМ40. При этом в качестве образцов сравнения были использованы ранее исследованные в полуэлементах импортные катализаторы – HiSPEC3000, показавший относительно высокую активность, и E-ТЕК 40, содержащий, как и РМ40, 40 мас. % Pt.

Результаты сравнительных испытаний катализаторов РМ40, E-ТЕК 40 и HiSPEC 3000 в МЭБ подтвердили наиболее высокую эффективность РМ40 (рис. 6). Так, максимальная удельная мощность, полученная в МЭБ с использованием катализатора РМ40, составила 736 Вт/г(Pt) или 341 мВт/см², что превышает значения мощности для E-ТЕК 40 и HiSPEC3000 (657 и 662 Вт/г(Pt) соответственно). Отметим, что значения максимальной удельной мощности МЭБ, полученные при использовании импортных материалов, хорошо соответствуют результатам [21].

При использовании катализатора РМ40 для МЭБ при $T = 20^\circ\text{C}$ и 100%-ной влажности газов было зафиксировано повышение его функциональных характеристик более чем на 10% по сравнению с импортными аналогами. Таким образом, сравнительные испытания катализаторов в МЭБ подтвердили высокую активность отечественного материала РМ40 и позволили перейти к испытаниям в энергетическом модуле ТЭ ТПЭ.

Метод нанесения катализатора является важным элементом технологии, определяющим не только характеристики МЭБ, но и его стоимость.

² В связи с низкими значениями масс-активности (табл. 2) стресс-тестирование электрокатализатора E-ТЕК 40 не проводили.

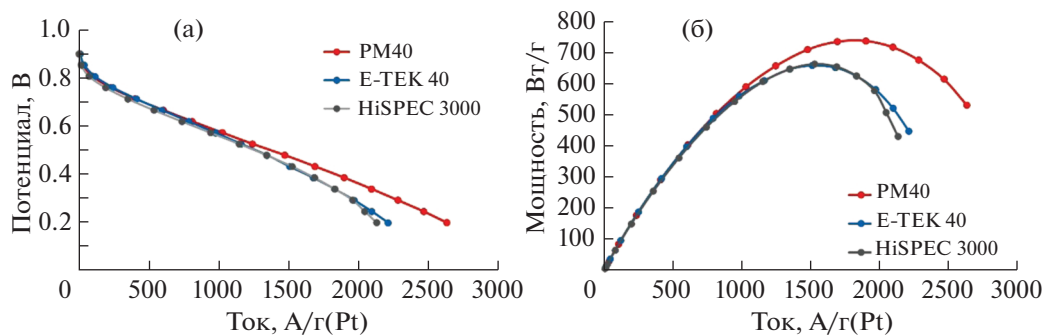


Рис. 6. Вольтамперные (а) и мощностные (б) удельные характеристики МЭБ с катализаторами РМ40, HiSPEC 3000 и E-TEK 40.

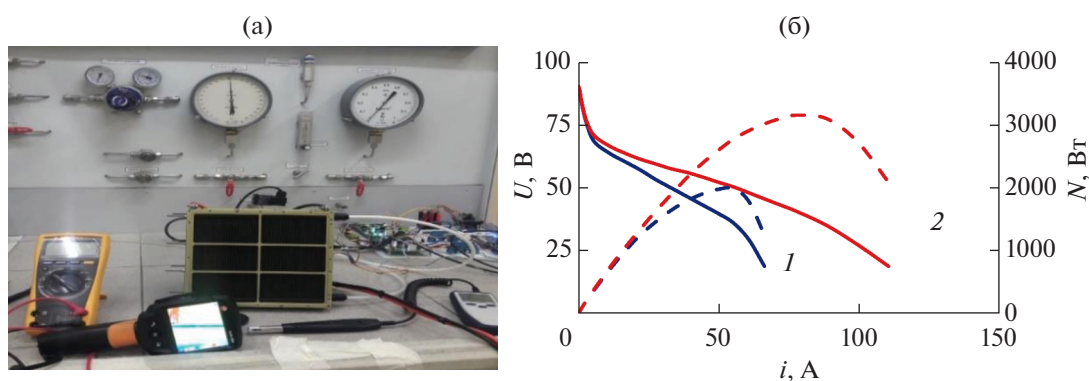


Рис. 7. Испытания энергетического модуля из 96 топливных элементов (VMPower) с открытым катодом без внешнего увлажнения реакционных газов; $T = 23^{\circ}\text{C}$, $RH = 60\%$; 1 – мембрана (30 мкм), 2 – DMD-технология. Катализатор Р40 “Прометей РД”. m_s^{Pt} (мг/см²): анод 0.2, катод – 0.4. Биполярные титановые элементы с покрытием “VMPower” (а); ВАХ и мощностные характеристики энергетического модуля (б).

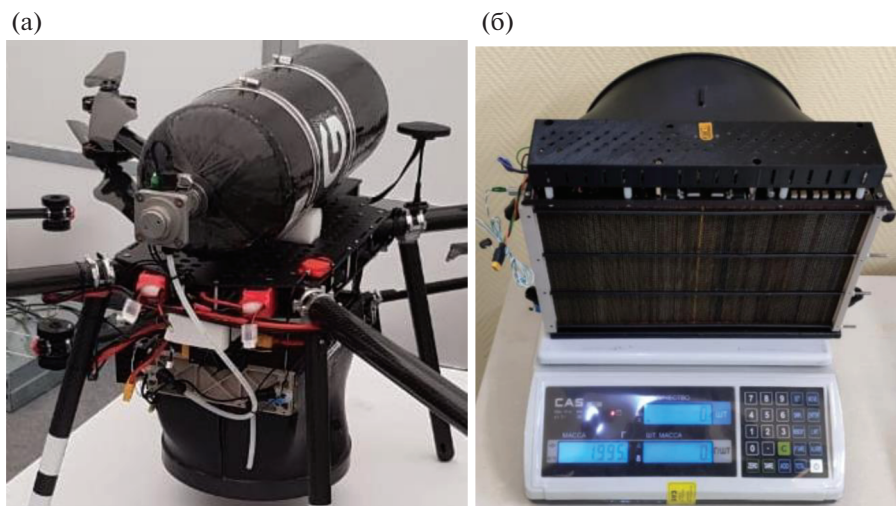


Рис. 8. БПЛА, оборудованный энергосистемой ТЭ ТПЭ “VMPower” с прямой подачей воздуха (а) и энергетический модуль $N = 2$ кВт “VMPower” (б).

Проведенное исследование показало, что при нанесении катализатора на газодиффузионный слой методом ультразвукового послойного напыления каталитических чернил и методом шелкотрафаретной печати из каталитической пасты их вольт-амперные характеристики (**ВАХ**) в энергетическом модуле практически не различаются. Также использовали технологию формирования мембраны на газодиффузионный слой из иономера (**DMD-технология**). В результате была подтверждена возможность изготовления МЭБ на основе более простой и дешевой технологии, не требующей использования сложного оборудования.

Катализатор РМ40 также был испытан в энергетическом модуле, состоящем из 96 топливных ячеек (рис. 7). Вольт-амперные характеристики были измерены при комнатной температуре входящего воздуха, специальных мер для увлажнения воздуха не предпринималось.

Как видно из рис. 6б, при использовании в МЭБ мембраны Nafion 211 в этих условиях достигается пологая ВАХ, которая заметно улучшается при переходе на DMD-технологию. По результатам проведенных испытаний разработанный катализатор рекомендован для использования в энергосистемах для БПЛА, которые производятся компанией “VMPower” (Сколково). На рис. 8 показаны одна из таких энергосистем с удельной мощностью ЭМ 1 кВт/кг и удельной энергией системы 700 Вт ч/кг (при использовании в приложении БПЛА) и энергетический модуль на 2 кВт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что отечественные топливные элементы и энергоустановки на их основе не уступают лучшим образцам аналогичной продукции, доступной потребителям на мировом рынке. Высокие удельная мощность энергетического модуля компании “VMPower” (до 1 кВт/кг) и энергоёмкость энергосистемы на ТЭ ТПЭ (700 Вт ч/кг) обусловлены совокупностью инновационных решений, качеством материалов и нанотехнологий, применяемых при изготовлении ключевых компонентов топливных элементов с твердым полимерным электролитом. Одним из таких компонентов являются наноструктурные Pt/C-электрокатализаторы, производимые компанией “Прометей РД” на основе оригинальных методик жидкофазного синтеза. Эти материалы демонстрируют функциональные характеристики, не уступающие или превышающие таковые у аналогов, производимых иностранными компаниями, лидерами мирового рынка катализаторов. По сравнению с зарубежными образ-

цами электрокатализаторы серии РМ характеризуются узкой дисперсией размерного и пространственного распределения наночастиц платины, более высокими значениями ЭХАП, масс-активности в реакции восстановления кислорода и коррозионно-морфологической стабильности.

Работа выполнена при поддержке Национального исследовательского университета “МЭИ” и Южного федерального университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang Y., Ruiz Diaz D.F., Chen K.S. et al. // *Materials Today*. 2020. V. 32. P. 178.
2. Gonzalez-Espasandin O., Leo T.J., Navarro E. // *Sci World J*. 2014. Article ID 497642.
3. Atkinson R.W., Hazard M.W., Rodgers J.A. et al. // *J. Electrochem. Soc.* 2017. V. 164. P. F46.
4. Datta A., Johnson W. // *J. Propulsion Power*. 2014. V. 30. № 2. P. 490.
5. Pan Z.F., An L., Wen C.Y. // *Appl. Energy*. 2019. V. 240. P. 473.
6. Куракосян С.А., Алексеенко А.А., Гутерман В.Е. и др. // *Российские нанотехнологии*. 2016. Т. 11. № 5–6. С. 14.
7. Alekseenko A.A., Guterman V.E., Belenov S.V. et al. // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2018. V. 43. P. 3676.
8. Shinozaki K., Zack J.W., Pylypenko S. et al. // *J. Electrochem. Soc.* 2015. V. 162. P. F1384.
9. Van der Vliet D., Strmcnik D.S., Wang C. et al. // *J. Electroanal. Chem.* 2010. V. 647. P. 29.
10. Khudhayer W.J., Kariuki N.N., Wang X. et al. // *J. Electrochem. Soc.* 2011. V. 158. P. 1029.
11. Alekseenko A.A., Moguchikh E.A., Safronenko O.I., Guterman V.E. // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2018. V. 43. P. 22885.
12. Xua Zh., Zhang H., Zhong H. et al. // *Appl. Catal. B*. 2012. V. 11–112. P. 264.
13. Kim O.-H., Ahn C.-Y., Kang S.Y. et al. // *Fuel Cells*. 2019. V. 19. P. 695.
14. Li Z., Deng X., Zhou H. et al. // *J. Solid State Electrochem.* 2020. V. 24. P. 195.
15. Perez J., Paganin V.A., Antolini E. // *J. Electroanal. Chem.* 2011. V. 654. P. 108.
16. Godínez-Salomón F., Arce-Estrada E., Hallen-López M. // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2012. V. 7. P. 2566.
17. Lv Y., Liu H., Li J. et al. // *J. Electroanal. Chem.* 2020. V. 873. P. 114444.
18. Martens S., Asen L., Ercolano G. et al. // *J. Power Source*. 2018. V. 392. P. 274.
19. Orfanidi A., Madkikar P., El-Sayed H.A. et al. // *J. Electrochem. Soc.* 2017. V. 164. P. F418.
20. Barbir F. *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*. NY: Elsevier, 2005. 456 p.
21. Millington B., Du S., Pollet B.G. // *J. Power Source*. 2011. V. 196. P. 9013.