

УДК 544.6 + 544.65 + 543.552 + 621.352.6

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

ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКИХ РАЗРЯДНЫХ КРИВЫХ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ВОЗДУШНО-ВОДОРОДНОГО ИСТОЧНИКА ТОКА

Исследованы возможности метода динамических разрядных кривых для отдельного исследования активности катализатора и диффузионных свойств каталитических слоев, которые во многом определяют характеристики источника тока на основе воздушно-водородных топливных элементов.

Кл. сл.: метод динамических разрядных кривых, активность катализатора, диффузионные свойства, топливные элементы, источник тока, водородная энергетика

ВВЕДЕНИЕ

Характеристики кислородно-водородных источников тока во многом определяются свойствами твердополимерных топливных элементов (ТПТЭ). Одним из основных методов исследования ТПТЭ, работающих при температурах, близких к комнатной, является метод разрядных кривых. При этом в литературе часто приводят разрядные характеристики, снятые с различной скоростью поляризации — как в динамическом, так и стационарном режимах [1–6]. Принято считать, что при незначительной скорости поляризации (несколько мВ/с) разрядные кривые не сильно отличаются от стационарных. Разрядные кривые, полученные в стационарном режиме (при каждом значении поляризации измеряемую систему выдерживают до стабилизации силы тока) при постоянной обдувке электродных пространств газами заданной влажности, отражают характеристики мембранно-электродного блока (МЭБ) в созданных условиях функционирования. Эти характеристики определяются наиболее медленной стадией общего электрохимического процесса. Для попытки выявления "узкого места" в работе МЭБ интерес представляют динамические разрядные кривые, снятые при различных скоростях поляризации.

В целом известны общие требования, предъявляемые к МЭБ и конструкции топливного элемента (ТЭ). Они предусматривают высокую электрокаталитическую активность катализатора, низкое диффузионное сопротивление каталитических слоев (КС), оптимальную структуру КС с развитой системой нанопор и транспортных пор, обеспечивающую большую концентрацию областей меж-

фазных границ. В части топливных ячеек требования касаются минимизации их электрического сопротивления, улучшения газообмена в КС и оптимизации водного обмена с окружающей средой.

Специфика работы кислородно-водородного топливного элемента с твердополимерной мембраной (ТЭТМ), как известно, состоит в необходимости присутствия в КС воды, обеспечивающей образование двойного электрического слоя (ДЭС), протонную проводимость протонпроводящей компоненты и ионный транспорт между этой компонентой и частицами катализатора. Однако избыток воды в КС резко снижает эффективные коэффициенты диффузии газов, участвующих в электрохимическом процессе, что приводит к падению плотности тока МЭБ. В идеале вода в КС должна постоянно присутствовать в виде тонкой пленки на поверхности катализатора и обеспечивать протекание электрохимического процесса, не создавая большого диффузионного сопротивления газам [7]. Вместе с тем вода является продуктом реакции, т. е. выделяется в процессе функционирования ТЭТМ. Таким образом, для стабильного функционирования МЭБ на высоком уровне плотности мощности необходимо поддерживать точный материальный баланс по воде [8–10] — отводить из сферы реакции строго определенное количество воды.

Для эффективного использования катализатора следует подбирать такую его загрузку, чтобы электрохимический процесс в МЭБ проходил при соизмеримых величинах скоростей реакции на поверхности катализатора и скоростей внешней и внутренней (в КС) диффузий, что реализуется при работе в области смешанной кинетики. Избыточная загрузка катализатора не приводит к суще-

ственному увеличению плотности мощности, т. к. плотность тока будет ограничена диффузионными процессами. В связи с этим возрастает роль структурных и диффузионных свойств КС.

Целью работы явилось исследование возможностей метода динамических разрядных кривых для раздельного исследования активности катализатора и диффузионных свойств КС, которые во многом определяют характеристики источника тока на основе воздушно-водородных топливных элементов.

НЕКОТОРЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СООБРАЖЕНИЯ

Как известно, для кислородно-водородных топливных элементов в силу существенного (на несколько порядков) различия плотностей токов обмена катодного и анодного процессов характер разрядной кривой (вольтамперной характеристики, ВАХ) определяется процессами, происходящими на катоде, поэтому в работе исходили из рассмотрения катодной стороны как лимитирующей.

На рис. 1 приведена характерная разрядная кривая (ВАХ) кислородно-водородного МЭБ и схема энергетических потерь [11–18].

ВАХ имеет четыре четко выраженных участка: I — необратимые потери напряжения, связанные со смешанным потенциалом в результате паразитных реакций (необратимая поляризация — η_{ir}); II — активационное падение напряжения на аноде и катоде, (активационная поляризация — $\eta_{act,a}$, $\eta_{act,c}$); III — область омического падения напряжения (омическая поляризация η_{ohm}); IV — область концентрационного падения напряжения (концентрационная поляризация η_{con}).

Таким образом, напряжение ячейки — E_{cell} описывается соотношением:

$$E_{Cell} = E_{Theor} - \eta_{ir} - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{con}. \quad (1)$$

Каждое из четырех типов перенапряжения выражения (1) дает вклад во всем диапазоне ВАХ, но основной и определяющий вклад в ВАХ, как правило, эти слагаемые дают на соответствующих участках.

Отклонение от стационарного режима функционирования (при скорости поляризации v больше нуля) — характер ВАХ должен измениться за счет изменения концентрационной поляризации. Согласно [19], в общем случае величину плотности тока без учета необратимых и омических потерь можно описать уравнением (2), основанным на соотношении Батлера—Фольмера:

$$I = I_0 \cdot \left[\left(1 - \frac{I}{I_{lim}^+} \right) \cdot \exp \left(\frac{\alpha \cdot \eta \cdot n \cdot F}{RT} \right) - \left(1 - \frac{I}{I_{lim}^-} \right) \cdot \exp \left(- \frac{(1 - \alpha) \cdot \eta \cdot n \cdot F}{RT} \right) \right], \quad (2)$$

где I и I_0 — плотности тока ячейки и тока обмена соответственно; I_{lim}^+ и I_{lim}^- — плотности предельных диффузионных токов прямой и обратной реакций соответственно; α — коэффициент перехода; η — перенапряжение; n — количество электронов, принимающих участие в реакции; F — постоянная Фарадея; R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура. Предэкспоненциальные множители могут быть описаны через соответствующие концентрации (3, 4):

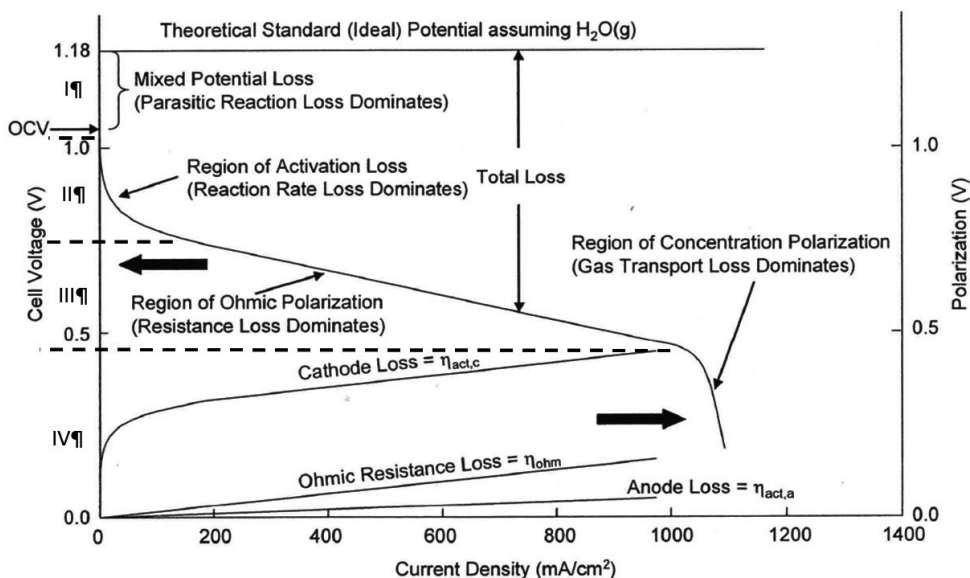


Рис. 1. Типичная вольтамперная (поляризационная) характеристика МЭБ на основе протонообменной мембраны [12]

$$\left(1 - \frac{I}{I_{\text{lim}}}\right) = \frac{C_s^{\text{Ox}}}{C_v^{\text{Ox}}}; \quad (3)$$

$$\left(1 - \frac{I}{I_{\text{lim}}}\right) = \frac{C_s^{\text{Red}}}{C_v^{\text{Red}}}; \quad (4)$$

где C_s^{Ox} и C_v^{Ox} — концентрации окисленной формы вещества (кислорода) у поверхности катализатора и в объеме соответственно; C_s^{Red} и C_v^{Red} — концентрации восстановленной формы вещества (воды, перекиси водорода) у поверхности катализатора и в объеме соответственно.

В стационарном режиме без учета конвекции и миграции концентрация веществ у поверхности катализатора определяется разностью скоростей диффузии (приток реагента из объема к поверхности, уход продуктов в объем) и реакции на поверхности катализатора (расходование реагента, образование продукта). В случае существенного превышения скорости реакции над скоростью диффузии (активный катализатор в достаточном количестве) общую плотность тока лимитирует диффузия, и наоборот.

В динамическом режиме характер зависимости $I(\eta)$ меняется за счет четырех факторов.

Во-первых, при увеличении скорости поляризации происходит все большее отклонение приповерхностной концентрации реагентов от стационарной, т. к. поляризация опережает изменение концентрации.

Во-вторых, появляется дополнительный ток разряда емкости ДЭС, описываемый соотношением (5):

$$C = \frac{dQ}{dE} = \frac{i}{v}, \quad (5)$$

где C — электрическая емкость; Q — заряд; E — потенциал; i — сила тока; v — скорость поляризации.

В-третьих, появляется дополнительный ток за счет разряда псевдоемкости адсорбированных на поверхности катализатора атомов.

В-четвертых, появляется дополнительный ток за счет Red—Ox процесса поверхностных групп атомов на углеродном материале КС, обычно это хинон-гидрохинонное равновесие [22–24].

Таким образом, при переходе в динамический режим с увеличением скорости поляризации вклад диффузионной составляющей ВАХ уменьшается, в то время как вклад реакции на поверхности катализатора (реакционной составляющей) возрастает и появляются дополнительные составляющие — токи, связанные с емкостями.

Оценим плотности тока, связанные с емкостью ДЭС и с псевдоемкостями для скорости поляризации, например, 500 мВ/с.

В обычном катодном каталитическом слое загрузка углеродного материала на 1 см² видимой поверхности КС составляет ~2 мг. При удельной площади поверхности ~200 м²/г (удельная площадь поверхности углеродной сажи типа Вулкан ХС-72 без учета потери поверхности при формировании КС) площадь поверхности углеродного материала составляет 1000 см². Учитывая удельную емкость ДЭС углеродной сажи типа Вулкан ХС-72, равную 15 мкФ/см² [20], емкость одного квадратного сантиметра видимой поверхности КС составит 0.015 Ф. Это при скорости поляризации 500 мВ/с соответствует плотности тока 7.5 мА/см².

Плотность тока, связанного с десорбцией кислорода с поверхности платины, можно оценить исходя из известной величины заряда, необходимого на десорбцию кислорода с 1 см² поверхности платины. При степени заполнения поверхности кислородом, равной 1, он равен 420 мкКл [13, 21]. Десорбция атомов кислорода происходит в диапазоне электродных потенциалов ~600 мВ. Таким образом, при скорости поляризации 500 мВ/с плотность тока составит 0.35 мА/см² (электрохимически активной поверхности платины). При обычной загрузке платины 1 см² видимой поверхности катодного каталитического слоя содержит платину с площадью электрохимически активной поверхности ~100 см². Таким образом, плотность тока десорбции атомов кислорода составит 35 мА/см² (видимой поверхности катодного КС).

Добавочная плотность тока, связанная с хинон-гидрохинонным Red—Ox равновесием обычно составляет около 0.1 от тока десорбции атомов с поверхности платины [22–24].

Характерные величины плотности тока реального МЭБ составляют сотни мА/см². Таким образом, при характерных величинах плотностей тока кислородно-водородных МЭБ, вклад емкостных и псевдоемкостных токов в измеряемую плотность тока при скорости поляризации до 500 мВ/с относительно невелик и составляет в худшем случае ~10 %.

Следует также отметить, что соотношение плотностей тока реакции восстановления молекулярного кислорода на катоде, предельного диффузионного тока и емкостных токов зависит от содержания платины в материале, диффузионного сопротивления КС и концентрации групп атомов, способных принимать участие в электрохимическом процессе. Очевидно, что при уменьшении доли платины в материале возрастает вклад емкостных токов в измеряемую плотность тока.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследовали образцы МЭБ с каталитическими слоями близкой структуры, но различной толщины и соответственно с разным содержанием катализатора на основе платинированной углеродной сажи типа Е-ТЕК и углеродных нанотрубок (УНТ). В качестве меры количества платины использовали площадь электрохимически активной ее поверхности.

Каталитические слои формировали на протон-проводящей мембране типа Nafion 212. Компонентный состав КС определяли по загрузке. Площадь электрохимически активной поверхности платины в МЭБ определяли по адсорбции-десорбции водорода в системе азот / водород [19]. Электрическое сопротивление МЭБ в ячейке, определяемое по высокочастотной отсечке годографа импеданса, не превышало $0.15 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ и не являлось лимитирующим фактором при исследуемых величинах плотностей тока и мощности.

МЭБ перед измерениями подвергали стандартной процедуре активизации, заключающейся в многократном циклировании электродных потенциалов в диапазоне от 0 до напряжения разомкнутой цепи со скоростью 10 мВ/с. Циклирование проводили до стабилизации электрических характеристик. Характеристики состава КС типичных МЭБ приведены в табл. 1.

Электрохимические измерения проводили в электрохимических ячейках, схематически показанных на рис. 2, а и б, для случаев реализации режимов закрытого и открытого катода соответственно, при отсутствии в обоих случаях избыточного давления воздуха. Продувку анодного пространства проводили в течение 1 с каждые 100 с (избыточное давление водорода ≈ 0.01 бар).

Табл. 1. Характеристики состава КС исследованных МЭБ

Образец	Содержание модифицированных УНТ, %	Площадь Pt в 1 см^2 катодного КС, см^2	Толщина катодного слоя, мкм
АТК-11	7.0	42.9	7.1
АТК-10	8.0	105	—
АТК-14	11	127	10.6
АДК-5	5.0	152	33
ЕНС-025	7.8	—	21
АДК-11	11	162	—
АДК-4	22	190	30
АН-7	0	248	—

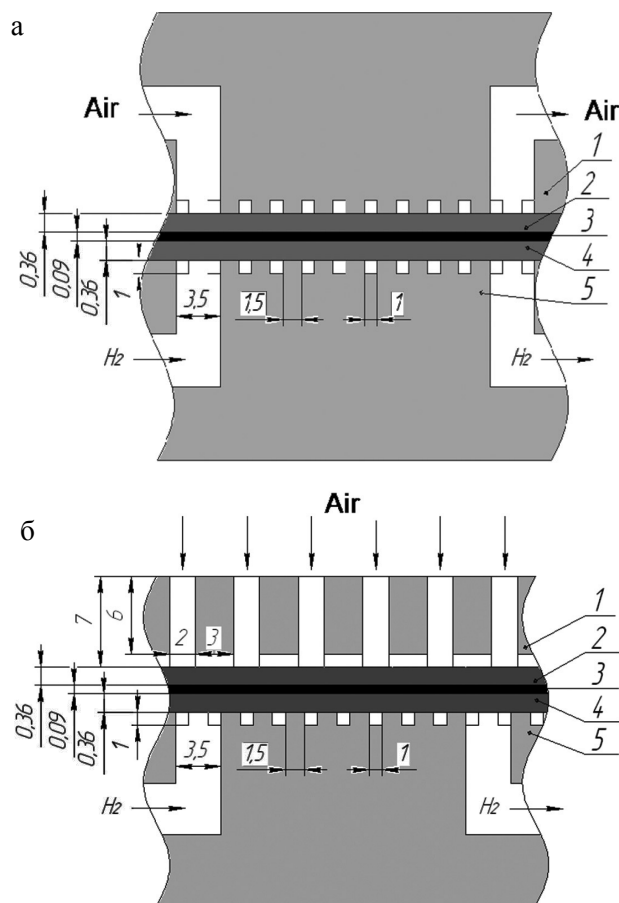


Рис. 2. Схема измерительной ячейки.

а — с закрытым катодным пространством; б — с открытым катодным пространством

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 изображено семейство характерных поляризационных кривых, снятых при различных скоростях поляризации и температурах.

В данной системе на электродах имеет место несколько последовательных процессов: внешний транспорт газов (кислорода и водорода) из объема газа к электроду, внутренняя диффузия газов в КС и реакция на поверхности катализатора, диффузия воды из толщи КС к его поверхности, диффузия воды через мембрану в анодное пространство, транспорт воды во внешнюю среду. Также необходимо учитывать диффузионные ограничения для кислорода, связанные с присутствием около 80 % азота в случае воздушно-водородных ТЭ.

На полярограммах (рис. 3) видны два характерных участка: первый с относительно большой крутизной кривых и второй более пологий. Например, для кривой, соответствующей скорости поляризации в 50 мВ/с (рис. 3, а), первый при E 580–920 мВ

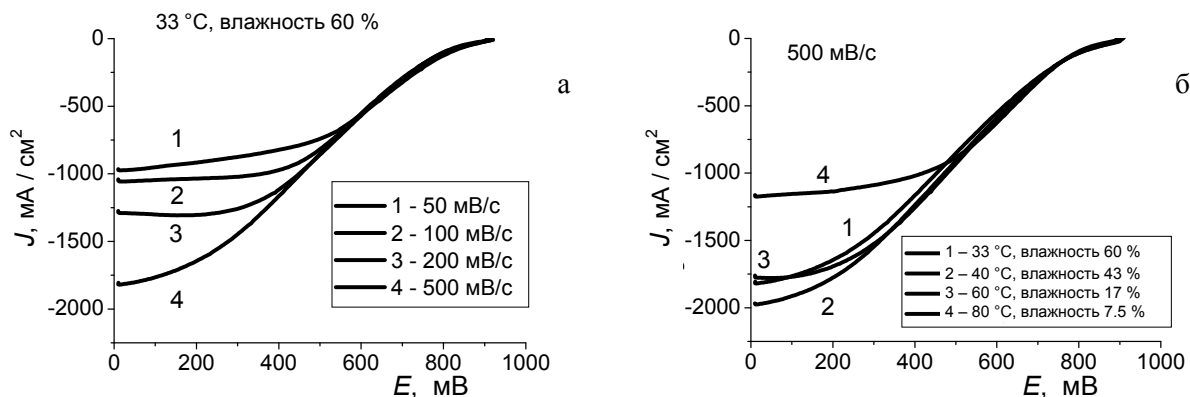


Рис. 3. Поляризационные кривые образца АДК-4 в системе O_2 (влажность ~ 22 г/м³) / H_2 (влажность ~ 22 г/м³) с продувкой газов в электродных пространствах (потоки водорода и кислорода 15 и 7 см³/мин соответственно).

а — разные скорости поляризации, б — разные температуры

и второй при 0–580 мВ. При этом при увеличении скорости поляризации плотность тока возрастает. Это свидетельствует о протекании процесса в области смешанной кинетики (при соизмеримых скоростях отдельных — диффузионного и реакционного — процессов). При небольших поляризациях (небольшие отклонения от напряжения разомкнутой цепи — 920 мВ) общий электрохимический процесс лимитируется реакцией на поверхности, тогда как при приближении E к 0 мВ кинетический ток настолько велик, что лимитирующими являются диффузионные стадии.

Из рисунка видно, что все кривые имеют хорошо выраженную концентрационную поляризацию (насыщение плотности тока при уменьшении напряжения), наступающую для различных скоростей поляризации (рис. 3, а) при различных E . При этом с увеличением скорости поляризации напряжение концентрационной поляризации сдвигается в область меньших величин, а плотность тока наоборот увеличивается, кривые распрямляются. Такое поведение кривых согласуется с теоретическими соображениями, приведенными выше.

Измерение емкости ДЭС исследованных МЭБ методом электрохимической импедансометрии показало, что она находится для разных образцов в диапазоне (0.01–0.02) Ф/см² (видимой поверхности КС). При этом плотность емкостного тока смещения при скоростях поляризации до 500 мВ/с не превышает 10 мА/см² и составляет незначительную часть измеряемой плотности тока.

Плотность тока в результате десорбции кислорода с поверхности платины (190 см²) при скорости поляризации 500 мВ/с составляет около

66 мА/см² (см. вычисления выше). По данным циклической вольтамперометрии в образце не обнаружено хинон-гидрохинонного Red—Ox равновесия.

Оценка количества, например, кислорода, запасенного в порах КС видимой площадью 1 см², толщиной 30 мкм, при пористости 70 %, показала, что оно (количество кислорода) обеспечивает перенос заряда в 0.36 Кл. Такой заряд при $\Delta E = 300$ мВ (рис. 3, а) при скорости поляризации $\nu = 500$ мВ/с соответствует плотности тока 600 мА/см².

Таким образом, дополнительные емкостные токи несут существенны по сравнению с токами основного электрохимического процесса. Причиной же такого поведения ВАХ является снятие ограничений по интенсивности массообмена в каталитических слоях. Об этом как раз и свидетельствует исчезновение характерного диффузионного загиба на поляризационных кривых по мере увеличения скорости поляризации (рис. 3, а). Однако предельная плотность тока все еще остается ограниченной некими диффузионными процессами, о чем свидетельствует форма полярограмм.

Причиной появления перенапряжения может быть как недостаточная скорость диффузии кислорода к поверхности катализатора (водород имеет в несколько раз больший коэффициент диффузии), так и отклонения водного массообмена от оптимального. Как известно, конденсация паров воды в КС приводит к существенному уменьшению эффективных коэффициентов диффузии реагентов. С другой стороны недостаточное количество воды в КС приводит к уменьшению

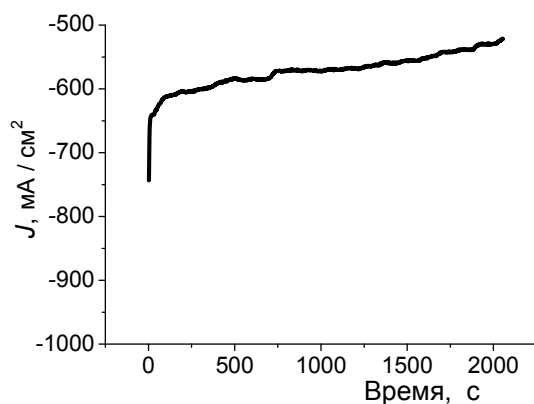


Рис. 4. Зависимость плотности тока от времени при $E = 500$ мВ для образца АДК-4 при 60°C в системе O_2 (влажность ~ 22 г/м³) / H_2 (влажность ~ 22 г/м³) с продувкой газов в электродных пространствах (потоки водорода и кислорода 15 и 7 см³/мин соответственно)

эффективности электродных реакций и увеличению ионного сопротивления системы.

Рис. 3, б, иллюстрирует влияние температуры и влажности на характер полярограмм и на предельно достигаемые плотности токов при одинаковой скорости поляризации. Интересно отметить, что предельные плотности токов имеют зависимость с максимумом от температуры. Это подтверждает предположение об ограничивающем влиянии водного массообмена. Действительно, при продувке электродных пространств газами с постоянной абсолютной влажностью, но при

разных температурах при температуре, близкой к комнатной имеет место переувлажнение КС. При повышении температуры выше некоторого критического значения и, следовательно, при уменьшении относительной влажности система уже испытывает дефицит воды — осушаются КС и протон-проводящая мембрана.

При работе того же образца в потенциостатическом режиме (рис. 4) он демонстрирует существенно меньшую плотность тока. При этом происходит стабилизация плотности тока на меньшем уровне, чем первоначальное значение, с тенденцией к некоторому уменьшению, что, вероятно, связано с небольшим дефицитом воды (см. выше).

Как отмечено выше, полярограммы, полученные при низких скоростях поляризации, характеризуют в большей степени диффузионные свойства КС МЭБ, в то время как полярограммы, полученные при высоких скоростях поляризации, характеризуют в большей мере электрокаталитическую активность КС МЭБ, возможности МЭБ при правильно организованном массообмене. Чувствительность полярограмм к скорости поляризации характеризует диффузионные свойства КС — чем больше чувствительность, тем больше диффузионное сопротивление.

Сказанное экспериментально подтверждено и проиллюстрировано на рис. П в Приложении, где показаны характерные полярограммы образцов с различными толщинами близких по структуре (морфологии) КС, снятые при разных скоростях поляризации в разных газовых системах. В данном случае толщина КС является мерой его диффузионного сопротивления.

Табл.2. Электрические характеристики различных МЭБ при работе в системе воздух (отн. влажность $\sim 40\text{--}60\%$) / H_2 (отн. влажность $\sim 5\%$); продувка анодного пространства каждые 100 с по 1 с; поток воздуха 7 см³/мин; $t = 23\text{--}24^\circ\text{C}$; $E = 500$ мВ; ячейка — по рис. 2, а

Образец	Максимальная удельная мощность в потенциодинамическом режиме (при 10 мВ/с), мВт/см ²	Время измерения, с	Удельная мощность в потенциостатическом режиме на участке стабилизации, мВт/см ²
АТК-11	294	1 000	200
АТК-10	410	1 000	225
АТК-14	440	10 000	200
АДК-5	330	3 600	200
ЕНС-025	300	2 700	143
АДК-11	200	4 700	102
АДК-4	205	2 070	87
АН-7	180	1 500	22

ПРИЛОЖЕНИЕ

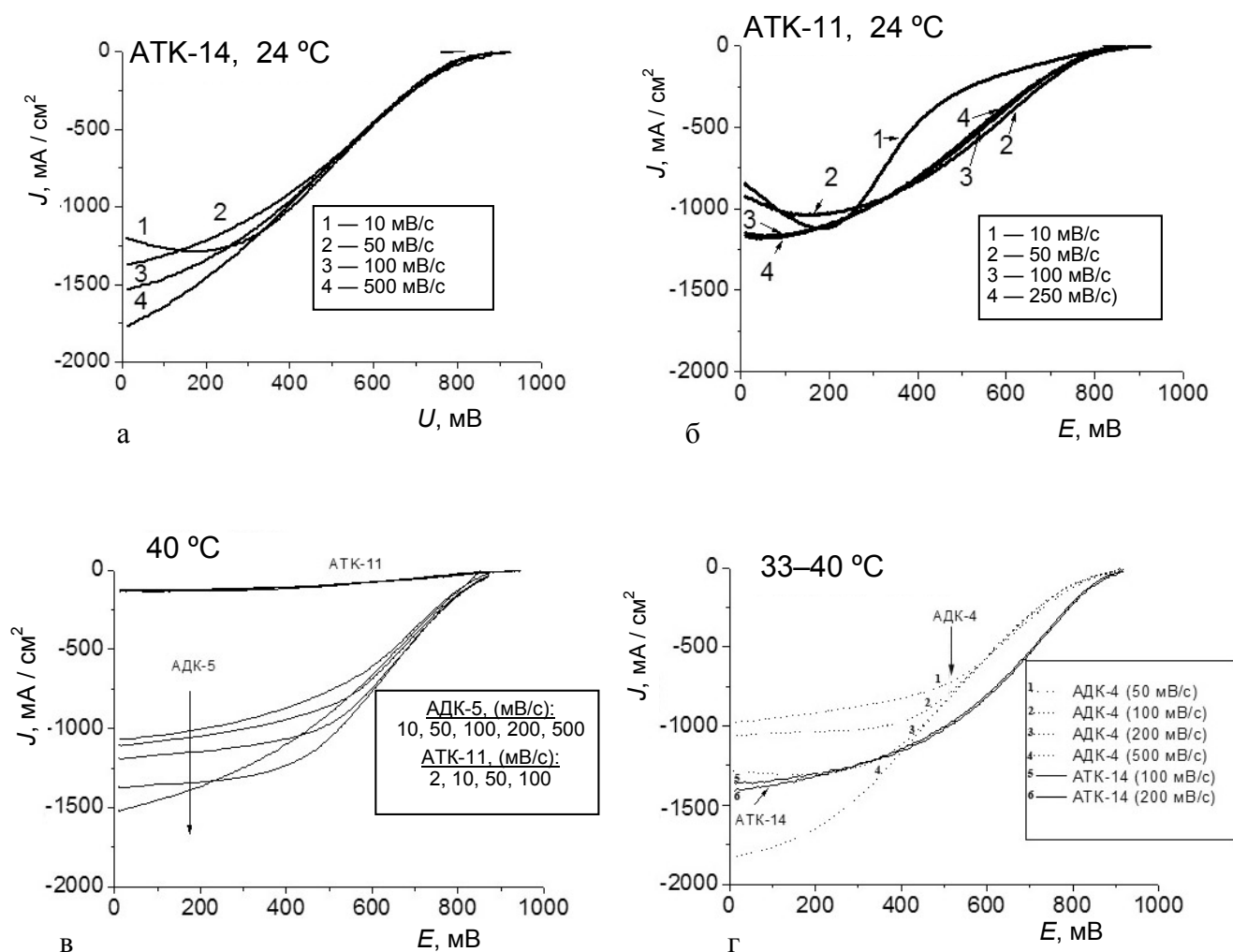


Рис. II. Полярограммы образцов с разными толщинами КС.

а, б — в системе воздух (влажность $\sim 12 \text{ г/м}^3$) / H_2 (влажность $\sim 1 \text{ г/м}^3$) с принудительной конвекцией воздуха (ячейка на рис. 2, а), продувка анодного пространства каждые 100 с по 1 с, поток воздуха $7 \text{ см}^3/\text{мин}$, $t = 24 \text{ }^\circ\text{C}$.
 в, г — в системе O_2 (влажность $\sim 22 \text{ г/м}^3$) / H_2 (влажность $\sim 22 \text{ г/м}^3$) с продувкой газов в электродных пространствах (потоки водорода и кислорода 15 и $7 \text{ см}^3/\text{мин}$ соответственно), $t = 33 \text{ }^\circ\text{C}$ (АДК-4) и $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (АДК-5, ATK-11, ATK-14). Стрелкой указано направление увеличения скорости развертки потенциала. Поляризационные кривые образца ATK-11 практически слились, то же для ATK-14

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fuel Cell Handbook. EG & G Services & Parsons, Inc. Staff SA/C, U.S. Department of Energy, Morgantown, WV, 2000. 292 p.
2. Blomen L.J.M., Mugerwa M.N. Fuel Cell Systems. N.Y.: Plenum Press, 1993. 614 p.
3. Bokris J.O.M., Srinivasan S. Fuel Cells: Their Electrochemistry. N.Y.: McGraw Hill, 1969. 659 p.
4. Carrette L., Friedrich K.A., Stimming U. Fuel cells: principles, types, fuels and applications // Chemphyschem. 2000. V. 1, N 4. P. 162–193.
5. Srinivasan S. et al. Fuel cell systems // Overview of Fuel Cell Technology / Blomen L.J.M.J., Mugerwa M.N. (eds). N.Y.: Plenum Press, 1993. P. 37–72.
6. Weber A.Z., Newman J. Modeling transport in polymer-electrolyte fuel cells // Chem. Rev. 2004. V. 104, N 10. P. 4679–4726.
7. Лидоренко Н.С., Мучник Г.Ф. Электрохимические генераторы. М.: Энергоиздат, 1982. 448 с.
8. Buie C.R., Posner J.D., Tibor Fabian et al. Water management in proton exchange membrane fuel cells using integrated electroosmotic pumping // J. Power Sources. 2006. V. 161. P. 191–202.
9. Colinart T., Chenu A., Didierjean S., Lottin O., Besse S. Experimental study on water transport coefficient

- cient in proton exchange membrane fuel cell // *J. Power Sources*. 2009. V. 190. P. 230–240.
10. *Астрова Е.В., Андроников Д.А., Горохов М.В. и др.* Портативные влагонезависимые воздушно-водородные топливные элементы с газораспределительной пластиной на основе щелочного кремния // *Письма в ЖТФ*. 2010. Т 36, вып. 11. С. 1–9.
 11. *Babir F.* PEM fuel cell: theory and practice. N.Y.: Elsevier Academic Press, 2005. 456 p.
 12. *Cooper K.R., Ramani F., Fenton J.M., Kunz H.R.* Experimental methods and data analyses for polymer electrolyte fuel cells. Scribner Associates, 2005. 119 p.
 13. *Дамаскин Б.Б., Петрий О.Ф.* Введение в электрохимическую кинетику. М.: Высшая школа, 1975. 416 с.
 14. *Дамаскин Б.Б., Петрий О.А., Цирлина Г.А.* Электрохимия, 2-е изд., испр. и перераб. М.: КолосС, 2006. 672 с.
 15. *Багоцкий В.С.* Основы электрохимии. М.: Химия, 1988. 400 с.
 16. *Батенков В.А.* Электрохимия полупроводников. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2002. 162 с.
 17. *Wu J., Yuan X.Z., Wang H. et al.* Diagnostic tools in PEM fuel cell research: Part I. Electrochemical techniques // *International journal of hydrogen energy*. 2008. V. 33. P. 1735–1746.
 18. *Lazarou S., Pyrgioti E., Alexandridis A.T.* A simple electric circuit model for proton exchange membrane fuel cells // *Journal of Power Sources*. 2009. V. 190. P. 380–386.
 19. *Zhang J.* PEM fuel cell electrocatalysts and catalyst layers. Vancouver: Springer, 2008. 1137 p.
 20. *Хрущева Е.И., Тарасевич М.Р.* Развитие электрохимического метода определения площади поверхности металлов // *Успехи химии*. 1978. Т. 47, вып. 5. С. 804–818.
 21. *Trassati S., Petrii O.* Real surface area measurements in electrochemistry // *J. Electroanal. Chem.* 1992. V. 327. P. 353–376.
 22. *Mathias M.F., Makharia R., Gasteiger H.A. et al.* Two fuel cell cars in every garage? // *Electrochem. Soc. Interface*. 2005. V. 14. P. 24–35.
 23. *Садов С.В., Соцкая Н.В., Кравченко Т.А.* Кинетические закономерности сорбции молекулярного кислорода катодно-активированным углем // *Журн. физич. химии*. 1993. Т. 67, № 10. С. 2027–2029.
 24. *Глебова Н.В., Нечитайлов А.А., Гурин В.Н.* Особенности электровосстановления кислорода на нанокompозите платинированная углеродная сажа—функционализированные углеродные нанотрубки // *ПЖТФ*. 2011. Т. 37, вып. 14. С. 32–38.

**Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,
РАН, г. Санкт-Петербург**

Контакты: *Нечитайлов Андрей Алексеевич*,
aan.shuv@mail.ioffe.ru

Материал поступил в редакцию 19.03.2013

THE POSSIBILITIES OF THE DYNAMIC DISCHARGING CURVES METHOD IN THE STUDY OF FUEL CELLS FOR AIR-HYDROGEN POWER SOURCE

A. A. Nechitailov, N. V. Glebova, A. A. Thomasov, N. K. Zelenina

Ioffe Institute, RAS, Saint-Petersburg

The possibilities of the method of dynamic discharging curves for the separate study of the activity of the catalyst and the diffusion properties of the catalytic layer, which largely determine the characteristics of the power source based on the air-hydrogen fuel cells.

Keywords: method of dynamic discharging curves, activity of the catalyst, diffusion properties, fuel cells, current source, hydrogen energy