

САМОУВЛАЖНЯЮЩИЙСЯ ПОРТАТИВНЫЙ ВОДОРОДО-ВОЗДУШНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ДЛЯ АВИАЦИИ И РОБОТОТЕХНИКИ

**И.Е. Баранов, В.Н. Фатеев, В.И. Порембский,
С.В. Акелькина, Е.К. Лютикова**

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182 Москва, пл. Акад. Курчатова, д. 1
E-mail: iv3000@mail.ru

Заключение совета рецензентов: 04.11.15 Заключение совета экспертов: 08.11.15 Принято к публикации: 12.11.15

Расчетным и экспериментальным путем определены температурные режимы работы водородо-воздушного твердополимерного топливного элемента, работающего в режиме самоувлажнения. Показано, что возможно реализовать работу топливного элемента без внешнего увлажнения при 30-40 °С. Показаны пути внедрения данной технологии в авиацию и представлены результаты работы по созданию энергоустановки БПЛА на самоувлажняющемся топливном элементе.

Ключевые слова: твердый полимерный электролит, топливный элемент, каталитический слой, мембрана, водяной баланс, электрохимическая кинетика, БПЛА.

THEMSELVES SATURATED A PORTABLE HYDROGEN-AIR FUEL CELL FOR AVIATION AND ROBOTICS

I.E. Baranov, V.N. Fateev, V.I. Poremsky, S.V. Akelkina, E.K. Lyutikova

National Research Centre "Kurchatov Institute"
1 Acad. Kurchatov sq., Moscow, 123098, Russia
E-mail: iv3000@mail.ru

Referred: 41.11.15 Expertise: 08.11.15 Accepted: 12.11.15

Calculated and experimentally determined operating temperature hydrogen-air solid polymer fuel cell in the themselves saturated mode. It has been shown that it is possible to realize the operation of the fuel cell without external humidification at 30-40 °C. The ways of implementation of this technology in aircraft are shown and results of work on creation of power plants to become themselves the UAV fuel cell element are presented.

Keywords: solid polymer electrolyte, fuel cell, catalyst layer, membrane, water balance, electrochemical kinetics, UAVs.



Иван Евгеньевич
Баранов
Ivan E. Baranov

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, начальник лаборатории НИЦ «Курчатовский институт».

Образование: Московский институт стали и сплавов (1990).

Область научных интересов: водородная энергетика, топливный элемент, твердополимерный электролит, электрокатализ, конверсия углеводородов.

Публикации: более 30.

Information about the author: PhD, head of laboratory of NRC «Kurchatov Institute».

Education: Moscow Institute of Steel and Alloys (1990).

Area of researches: hydrogen energetics, fuel cell, a solid polymer electrolyte, electrocatalysis, conversion of fuels.

Publications: more than 30.



Владимир Николаевич
Фатеев
Vladimir N. Fateev

Сведения об авторе: д-р хим. наук, профессор, зам. руководителя ККФХТ по научной работе НИЦ «Курчатовский институт».

Образование: МГУ им. М.В. Ломоносова (1974).

Область научных интересов: физическая химия, электрохимия, наноматериалы, водородная энергетика, электролиз, топливные элементы, электрокатализаторы.

Публикации: более 200.

Information about the author: PhD, DSc (Chemistry), Professor, Deputy Head of KCPCT on scientific work of NRC "Kurchatov Institute".

Education: Lomonosov Moscow State University (1974).

Area of researches: physical chemistry, electrochemistry, nanomaterials, hydrogen energy, electrolysis, fuel cells, electrocatalysts.

Publications: more than 200.



Владимир Игоревич
Порембский
Vladimir I. Porembsky

Сведения об авторе: зам. руководителя отделения электрохимических и водородных технологий НИЦ «Курчатовский институт».

Образование: Московский химико-технологический институт (1980).

Область научных интересов: водородная энергетика, топливный элемент, твердополимерный электролит, электрокатализ, электролиз.

Публикации: более 60.

Information about the author: head of department of NRC «Kurchatov Institute».

Education: Moscow Chemical-Technological Institute (1980).

Area of researches: hydrogen energetics, fuel cell, a solid polymer electrolyte, electrocatalysis, electrolysis.

Publications: more than 60.



Светлана
Владимировна
Акелькина
Svetlana V. Akelkina

Сведения об авторе: начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт».

Образование: Российский химико-технологический университет (1986).

Область научных интересов: водородная энергетика, топливный элемент, твердополимерный электролит, электрокатализ, электролиз.

Публикации: более 20.

Information about the author: chief of laboratory of NRC «Kurchatov Institute».

Education: Russian Chemical-technological university (1986).

Area of researches: hydrogen energetics, fuel cell, a solid polymer electrolyte, electrocatalysis, electrolysis.

Publications: more than 20.



Елена
Константиновна
Лютикова
Elena K. Lyutikova

Сведения об авторе: начальник лаборатории ККФХТ НИЦ «Курчатовский институт».

Образование: Московский авиационный технологический институт (1978).

Область научных интересов: водородная энергетика, топливный элемент, твердополимерный электролит, электрокатализ, электролиз.

Публикации: более 20.

Information about the author: chief of laboratory of KCPCT of NRC «Kurchatov Institute».

Education: Moscow Aviation Technology Institute (1978).

Area of researches: hydrogen energetics, fuel cell, a solid polymer electrolyte, electrocatalysis, electrolysis.

Publications: more than 20.



Введение

В последние годы наблюдается бурное развитие энергоснабжения мобильных систем с аккумулятором в качестве источника энергии. Автомобили, малая авиация, автономная робототехника постепенно начинают переходить с ДВС на электрическую тягу [1, 2]. Можно предположить, что следующим шагом будет замена аккумулятора для данных приложений на твердополимерный водородо-воздушный топливный элемент (ТЭ), подсоединенный к легкому баллону со сжатым или сжиженным водородом. Например, для малой авиации и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) такой энергоисточник можно использовать в качестве основной силовой установки, на широкофюзеляжных лайнерах – в качестве вспомогательных или резервных источников электрической мощности.

Общее количество энергии, запасенной в таком энергоисточнике, определяется в отличие от химического аккумулятора не весом гальванических ячеек, а запасом водорода в баллоне и, соответственно, весом баллона. Оценки показывают, что при энергосодержании элемента выше 10 кДж/кг вес системы на ТЭ ниже веса аккумулятора с аналогичным энергосодержанием в 2-3 раза.

Силовая энергоустановка, включающая электродвигатель, ТЭ и бак с водородом, по сравнению с традиционным приводом на тепловой машине, включающим ДВС и бак с жидким углеводородом, имеет следующие существенные принципиальные преимущества:

1. Отсутствие ограничения Карно по максимальному КПД. У ТЭ при рабочей температуре менее 100 °С легко достигается КПД преобразования энергии топлива 70-80%.

2. Химическое преобразование энергии сгорания водорода обуславливает отсутствие механических узлов движущихся частей и деталей. Процесс регулируется только электрической нагрузкой, отсюда простота конструкции, надежность, меньшая шумность и легкость технического обслуживания.

3. Водород как топливо имеет в 3 раза большую удельную энергию: 120 МДж/кг по сравнению с 40 МДж/кг у жидких углеводородных топлив. В авиации, где на вес топлива приходится значительная часть от веса летательного аппарата, использование водорода способно в 2-3 раза поднять дальность полета или вес полезной нагрузки. Отметим, что водород может храниться на борту в сжатом или сжиженном виде. Технология использования жидкого водорода в качестве топлива уже давно отработана в нашей стране на экспериментальном самолете ОКБ Туполева Ту-155.

Но для реализации легких энергоустановок на ТЭ в авиации и робототехнике необходимо иметь легкие ТЭ, а это выдвигает следующее требование – ТЭ воздушного, а не водяного охлаждения. Причем оптимальным является использование воздуха одно-

временно и как реагента, и как теплоносителя. При КПД 60-70% ТЭ переводит 30-40% энергии топлива в тепло. Для выноса этого тепла из твердополимерного ТЭ, работающего при температуре 40-80 °С, необходимо прокачивать через ТЭ значительное количество воздуха, иначе наступит перегрев, высыхание и деструкция мембраны.

Необходимость прокачивать через воздухоохлаждаемый ТЭ большое количество охлаждающего воздуха, в свою очередь, приводит к проблеме потери влаги из ТЭ. Дело в том, что твердополимерный ТЭ имеет специфическую особенность: его мембрана проводит электрический ток, только будучи увлажненной, при высыхании процесс генерации электроэнергии прекращается. Компенсировать потери влаги, уносимой прокачиваемым через ТЭ воздухом, можно, добавляя воду, увлажняя воздух, увлажняя водород и находя режимы, когда воды, выделяющейся в реакции, хватает для компенсации потерь воды, уносимой большим количеством прокачиваемого через ТЭ воздуха. Наиболее конструктивно простой и удобный способ предотвращения потерь воды – подбор режимов работы и разработка конструкции такого ТЭ, в котором мембрана ТЭ самоувлажняется выделяющейся в реакции влагой.

В данной статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований водного баланса в мембранно-электродных блоках воздухоохлаждаемого МЭБ ТЭ с большим расходом воздуха, работающего в режиме самоувлажнения. Представлены результаты испытаний разработанного ТЭ в составе энергоустановки.

Исследования водяного баланса мембранно-электродных блоков (МЭБ) воздухоохлаждаемого самоувлажняющегося ТЭ и выбор оптимальных режимов работы

На начальном этапе исследований необходимо провести оценку возможности работы батареи ТЭ без увлажнения воздуха. Дадим некоторые расчеты и оценки параметров, определяющих режим работы батареи.

Расход воздуха для эффективного снятия тепла

Оценим объемы прокачиваемого через батарею ТЭ воздуха для эффективного снятия тепла реакции. Посчитаем нагрев выходящего из батареи воздуха в предположении, что батарея работает в стационарном режиме и все тепло, выделившееся в реакции, идет на нагрев воздуха.

Уравнение баланса тепла:

$$\frac{I}{nF} \Delta H - IU = J_{air} C_p \Delta T \quad (1)$$

где I – габаритный ток, А/см²; J_{air} – расход воздуха, моль/см² МЭБ; F – константа Фарадея; n – число электронов, участвующих в реакции; C_p – теплоем-



кость воздуха; U – текущее напряжение ячейки, В; ΔH – тепловой эффект реакции $H_2 + \frac{1}{2}O_2 = H_2O$ – 241 кДж/моль; ΔT – разница температуры воздуха на входе и на выходе батареи, °С.

Введем понятие кратности расхода воздуха (Krn). Это отношение текущего расхода воздуха к расходу воздуха с полным использованием кислорода в реакции при характерном для данного типа ТЭ удельном токе 1 А/см².

Расход воздуха связан с величиной кратности следующим образом:

$$J_{air} = \frac{I}{2nF} \frac{Krn}{0,21}. \quad (2)$$

Откуда

$$\Delta T = \frac{\Delta H - UnF}{C_p} \frac{2 \cdot 0,21}{Krn}. \quad (3)$$

Результаты расчета по (3), связывающего кратность, рабочее напряжение и прирост температуры, представим в таблице.

Зависимость кратности по количеству воздуха от напряжения работы ТЭ

The dependence of the multiplicity on the air amount from the FC working voltage

Рабочее напряжение, U	Формула, связывающая ΔT и Krn	Krn , ($\Delta T = 10^\circ C$)
0,7	$\Delta T = 1480/Krn$	148
0,6	$\Delta T = 1750/Krn$	175
0,5	$\Delta T = 2020/Krn$	202
0,4	$\Delta T = 2300/Krn$	230

То есть для приемлемого нагрева $\Delta T \sim 10^\circ C$ (это значение выберем для предотвращения сильного испарения воды из мембраны, как будет показано ниже) кратность по подаче воздуха при $U = 0,5$ В должна быть на уровне 200, а при $U = 0,7$ В – на уровне 140, что значительно больше, чем у ТЭ с водяным охлаждением, где кратность обычно находится в диапазоне 3-5.

Оценка выноса воды в случае отсутствия ограничений по диффузии в коллекторе тока

Рассмотрим работу самоувлажняющегося МЭБ, когда мембрана увлажняется водой, выделившейся в результате реакции окисления водорода, а подаваемый воздух не содержит паров воды.

МЭБ содержит мембрану толщиной 50 мкм, на которую нанесены каталитические слои (30 мкм) и которая зажата между двумя коллекторами тока, представляющими слои толщиной 300 мкм из углеродного нетканого волокнистого материала типа

войлока. Кроме того, между каталитическим слоем и слоем углеродного нетканого материала коллектора тока нанесен углеродный сажевый подслои толщиной 30 мкм. С коллекторами тока контактируют биполярные пластины, в каналах которых и протекают воздух и водород (на противоположной стороне от мембраны).

Кислород воздуха, для того чтобы вступить в реакцию, должен продиффундировать из воздуха, находящегося в каналах биполярной пластины, через коллектор тока (нетканый материал и сажевый подслои) в каталитический слой, где вступит в реакцию с образованием воды, которая должна быть удалена из каталитического слоя в жидком виде (когда пар насыщен) или в виде пара, когда его давление меньше давления насыщенного пара.

Коллекторы тока в принципе могут представлять некий барьер, препятствующий диффузионному выносу паров воды из мембраны в воздушные каналы с сухим воздухом. Для интерпретации экспериментальных данных, представленных ниже, предложим несколько оценок. Определим расход воздуха (кратность), когда на выходе присутствует насыщенный пар воды.

Количество воды, выделяющейся в реакции на катоде:

$$J_{H_2O}^r = \frac{I}{nF}. \quad (4)$$

Количество воды, уносимое воздухом:

$$J_{H_2O}^{air} = \frac{I}{2nF} \frac{Krn}{0,21} (P_{вых}^{H_2O} - P_{вх}^{H_2O}) \quad (5)$$

где $P_{вх}^{H_2O}$, $P_{вых}^{H_2O}$ – давление паров воды на входе и на выходе в батарею в атм.

Зависимость давления насыщенных паров воды от температуры представлена на рис. 1.

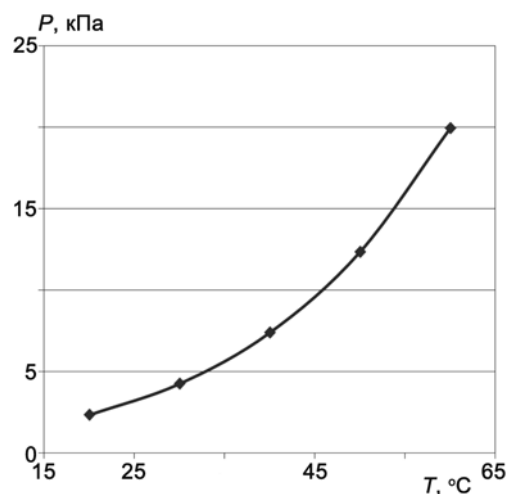


Рис. 1. Зависимость давления насыщенных паров воды от температуры [3]

Fig. 1. The dependence of the saturated vapor pressure of water temperature [3]

Примем для оценки, что давление паров воды на выходе соответствует давлению насыщенного пара при рабочей температуре ТЭ, а давление паров воды на входе примем равным нулю.

Приравниваем количество воды, выделяющейся в реакции на катоде, и уносимое воздухом, получаем кратность по воздуху K_{rn} , полученное из условия насыщенного пара на выходе:

$$K_{rn} = \frac{2 \cdot 0,21}{P_{\text{вых}}^{\text{H}_2\text{O}} - P_{\text{вх}}^{\text{H}_2\text{O}}} \quad (6)$$

Оценочно при температуре батареи 40 °С требуемое значение $K_{rn} = 5,25$, при температуре батареи 50 °С – $K_{rn} = 3,5$.

Эти значения существенно меньше оценки K_{rn} , полученной ранее, исходя из требования перегрева батареи не более чем на 10 °С, что говорит о том, что при условии отсутствия ограничений диффузионного переноса воды через материал коллектора тока при кратности порядка 100 вся выделившаяся в реакции вода будет вынесена потоком воздуха и произойдет осушка мембраны и прекращение генерации тока.

Диффузионный вынос воды через материал коллектора тока

Оценим, может ли материал коллектора тока быть барьером, препятствующим выносу воды из мембраны топливного элемента. Литературные данные [4] описывают связь эффективного коэффициента диффузии в пористых телах с коэффициентом диффузии в газе как

$$D_p = D_0 (P/\beta), \quad (7)$$

где P – пористость, а β – коэффициент извилистости пор.

Коэффициент диффузии воды в воздухе составляет при 298 К – 0,2 см²/с [3]. Эксперименты по измерению газодинамической проницаемости (измерение коэффициента Дарси) и дальнейшие расчеты позволили дать оценку параметру P/β для используемых в ТЭ коллекторов тока, включающих как сажевый подслои, так и углеродный войлок. Это значение для коллектора (слоя углеродного нетканого материала с нанесенным на него сажевым подслоем) составило ~ 0,1.

Диффузионный поток воды (в моль/см²·с) через коллектор тока оценим по формуле

$$J_D^{\text{H}_2\text{O}} = D_0 (P/\beta) \frac{(P_{T=40}^{\text{H}} - P_{T=20}^{\text{H}})(1/22400)}{l_{KT}}, \quad (8)$$

где l_{KT} – толщина коллектора тока, см; $P_{T=20}^{\text{H}}$ – давление насыщенного пара в подаваемом воздухе при 20 °С; $P_{T=40}^{\text{H}}$ – давление пара в газовых порах каталитического слоя (насыщенный пар при температуре МЭБ).

Подставляя в (8) значение $(P_{T=40}^{\text{H}} - P_{T=20}^{\text{H}})(1/22400) = 3\text{E-}6$ моль/см³ и толщину углеродного подслоя 0,03 см, получаем диффузионный поток воды через коллектор тока, который равен

$$J_D^{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,02 \cdot 3\text{E-}6}{0,03} = 2\text{E-}6 \text{ моль/см}^2 \cdot \text{с}.$$

Сравним это значение с количеством выделившейся на катоде в реакции воды:

$$J_{\text{H}_2\text{O}}^r = \frac{I}{nF}. \quad (9)$$

При характерном токе 0,5 А/см² поток воды, рассчитанный по формуле $J_{\text{H}_2\text{O}}^r$, равен 2,6E-6 моль/см²·с.

Сравнивая количество выделившейся воды с оценочным диффузионным потоком, можно сделать вывод, что при используемых параметрах: температуре 40 °С, токе 5 А/см² и параметре пористой среды $P/\beta = 0,1$ – диффузионный вынос сопоставим с генерацией воды, поэтому приведенная оценка показывает, что коллектор тока при данных параметрах может представлять диффузионный барьер для выноса воды, что обеспечивает режим самоувлажнения МЭБ.

Приравняв количество выделяющейся в реакции воды (8) и вынос воды диффузией в газовой фазе (9), можно записать условие самоувлажнения, избыток реакционной влаги при выполнении этого условия удаляется из МЭБ в виде жидкости, мембрана увлажнена, и МЭБ работает стабильно:

$$\frac{I}{nF} \geq D_0 \frac{P}{\beta} \frac{(P_{T=40}^{\text{H}} - P_{T=20}^{\text{H}})(1/22400)}{l_{KT}}. \quad (10)$$

При невыполнении этого условия МЭБ пересыхает.

Анализируя (10), можно сказать следующее: реализация режима самоувлажнения для МЭБ зависит от свойств материала коллектора тока (параметр P/β) и от параметров, определяющих режим работы МЭБ – температуры и удельного тока.

Для практических приложений в качестве задаваемого исходного параметра часто используется не ток, а рабочее напряжение. Наиболее часто используемый для практических приложений интервал рабочих напряжений ТЭ составляет 0,4-0,7 В. В этом интервале ток изменяется достаточно сильно, так, согласно приведенной ниже, на рис. 5, вольт-амперной характеристике, удельный ток (которому прямо пропорционально количество выделившейся реакционной воды) при 0,4 В составляет 0,6 А/см², а при 0,7 – всего 0,1 А/см², то есть меньше в 6 раз. Другим фактором, сильно влияющим на вынос воды, является температура МЭБ, входящая в (10) через давление насыщенных паров. Как видно из рис. 1, при изменении температуры с 30 до 60 °С давление насыщенных паров воды увеличилось с 4 кПа при 30 °С до 20 кПа при 60 °С, то есть в 5 раз.

Таким образом, расчетным способом показано, что МЭБ ТЭ принципиально может работать в режиме самоувлажнения при пониженных температурах 30-50 °С и коллектор тока может при этом ограничивать вынос воды из мембраны.

Для полного подтверждения работоспособности ТЭ в режиме самоувлажнения необходимы прямые эксперименты по исследованию стабильности работы. Результаты таких исследований представлены в следующем разделе.

Экспериментальные исследования работы МЭБ в режиме самоувлажнения

Испытания работоспособности единичного МЭБ в режиме самоувлажнения проходили на стандартной станции тестирования [5] ТЭ. Для проведения этих экспериментов установка была дополнена двумя байпасами, позволившими оперативно направлять потоки воздуха и водорода в «обход» штатных увлажнителей.

Испытания проходили в режиме внешнего термостатирования, температура ячейки регулировалась при помощи внешнего термостатирующего контура.

Использовалась ячейка с размерами, близкими к характерным размерам ТЭ, предлагаемого для БПЛА, размеры активной части испытуемого МЭБ составляли 70×70 мм.

В экспериментах использовались МЭБ, в составе которых были использованы мембрана Nafion 212 50 мкм толщиной, коллектор из углеродного материала Пантекс и катализатор 40% масс. Pt на углеродном носителе, полученный методом магнетронного напыления [6]. В качестве прижимных элементов монополярных пластин испытательной ячейки использовалась титановая сетка.

В ячейку ставился МЭБ с подсушенной мембраной, после чего проводилось стартовое увлажнение мембраны заливом в воздушные полости ячейки воды и 10-минутной работой ячейки с увлажненным воздухом при температуре 85 °С. После этого увлажнители отключались, воздух и водород подавались на ячейку через байпасы, и проходили испытания в режиме самоувлажнения.

Испытания МЭБ проводились в 2 этапа, на первом из них получали вольт-амперные характеристики МЭБ в режиме гарантированного увлажнения при заданной температуре. Эти характеристики снимали, подавая на МЭБ сухой воздух и выдерживая длительное время (20 мин) в режиме большого (0,8-1 А/см²) тока, затем снимали вольт-амперную характеристику за 10 мин, затем снова выдержка при большом токе, после чего повторно снималась вольт-амперная характеристика. Эти вольт-амперные характеристики показаны на рис. 5. Экспериментально было показано, что при относительно низких температурах (30-40 °С) увлажнение работой на больших токах предпочтительнее увлажнения входящих газов.

Испытания работы МЭБ в режиме самоувлажнения проводились следующим образом. После постановки МЭБ в испытательную ячейку осуществлялось стартовое увлажнение МЭБ, после чего к ячейке подключалась активная нагрузка с постоянной величиной. Напряжение и ток фиксировались по времени. Результаты испытаний при температуре ячейки 30, 50 и 60 °С показаны на рис. 2-4 соответственно.

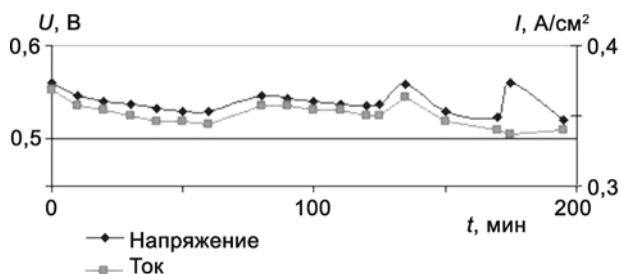


Рис. 2. Временное изменение напряжения и тока ячейки ТЭ при работе на одну нагрузку. Температура 30 °С. Расход воздуха 22 см³/с

Fig. 2. Temporary change of voltage and current cell FC at work on a load. 30 °C. Air flow rate 22 cm³/s

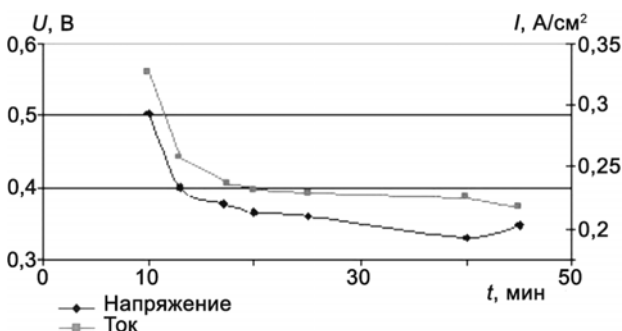


Рис. 3. Временное изменение напряжения и тока ячейки ТЭ при работе на одну нагрузку. Температура 50 °С. Расход воздуха 22 см³/с

Fig. 3. Temporary change of voltage and current cell FC at work on a load. Temperature 50 °C. Air flow rate 22 cm³/s

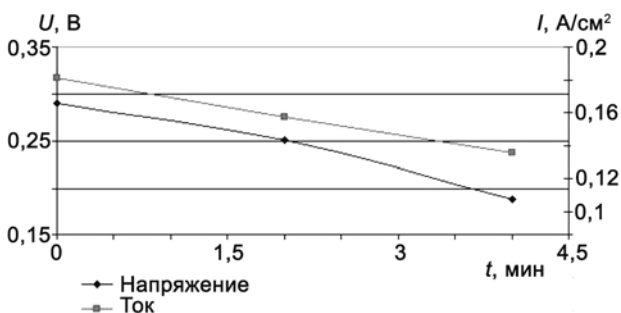


Рис. 4. Временное изменение напряжения и тока ячейки ТЭ при работе на одну нагрузку. Температура 60 °С. Расход воздуха 22 см³/с

Fig. 4. Temporary change of voltage and current cell FC at work on a load. 60 °C. Air flow rate 22 cm³/s

Обобщенные результаты испытаний представлены на рис 5, где приведены вольт-амперные кривые, построенные при температуре 30 °С и выдержке между снятием в режиме большого тока 0,6 А, что обеспечивало гарантированное самоувлажнение. Также на график нанесены точки, соответствующие работе на постоянную нагрузку, эти точки соответствуют некоему стационарному состоянию, на котором МЭБ находится через час испытаний (см. рис. 2 и 3). В случае 60 °С напряжение и ток не вышли на постоянный режим работы, приведенная на графике для сравнения точка соответствует напряжению и току после 10 мин работы.

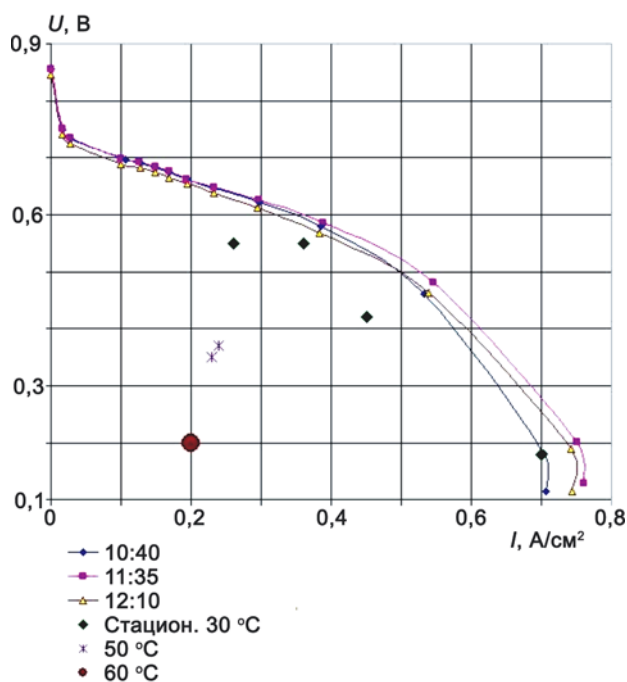


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики при 30 °С и точки стабильной работы при других температурах. Расход воздуха 22 см³/с

Fig. 5. The current-voltage characteristics at 30 °C and points of stable operation at other temperatures. Air flow rate 22 cm³/s

Анализируя графики 2-4, можно сделать вывод, что стационарная работа МЭБ в режиме самоувлажнения достигается при температуре МЭБ до 40 °С включительно и токах выше 0,25 А/см².

При температурах 50-60 °С происходит высыхание мембраны МЭБ. При этом параметры сильно падают в течение 10 мин, а затем выходят на квазистационарное значение, которое тем меньше, чем выше температура. Возможно, данный эффект наблюдаемого при 50 °С стационара связан с неравномерностью нагрева и влажностного режима по площади МЭБ.

Для данного МЭБ граничный ток 0,25 А/см² соответствует напряжению 0,65 В. Выше этого напряжения стационарная работа невозможна. Необходимо отметить, что приведенные вольт-амперные ха-

рактеристики соответствуют работе МЭБ в условиях одиночной ячейки. При работе МЭБ в составе батареи кривая вольт-амперной характеристики пойдет несколько ниже, и граничному току 0,25 А/см² будет соответствовать более низкое напряжение.

Дополнительно было исследовано влияние расхода воздуха на работу ячейки ТЭ в режиме самоувлажнения. Показано, что в диапазоне расхода воздуха с кратностью 5-30 изменение расхода воздуха не сказывается на работе ТЭ.

После того, как на экспериментах в отдельной ячейке была показана возможность реализации режима самоувлажнения и даны границы области рабочих режимов по току и температуре, где реализуется этот процесс, были изготовлены и испытаны несколько батарей ТЭ мощностью 250 Вт, которые могут быть уже использованы в составе энергоустановки БПЛА. Вес данной батареи 1,5 кг, габариты 98х200х200, батарея содержит 56 МЭБ и работает при напряжении 36 В.

Проведенные испытания батареи показали возможность ее работы в течение 40 мин в режиме самоувлажнения при постоянных значениях напряжения и тока. Экспериментально подтверждена мощность батареи 250 Вт.



Рис. 6. Внешний вид беспилотного летательного аппарата с основной силовой установкой на ТЭ

Fig. 6. Appearance unmanned aerial vehicle with the FC main power plant

Батарея ТЭ была испытана в составе силовой установки БПЛА, показанного на рис. 6. Кроме батареи ТЭ в состав данной силовой установки вошел углепластиковый водородный баллон, редуктор, электродвигатель с пропеллером и система управления. БПЛА продемонстрировал устойчивый полет в течение 40 мин.

Работа выполнена на средства Российского Научного Фонда. Грант № 14-29-00111.

Список литературы

1. Баранов И.Е., Фатеев В.Н., Порембский В.И., Калинин А.А. Авиационная силовая установка на водородовоздушных твердополимерных топливных элементах // Транспорт на альтернативном топливе. 2015. № 3(45).
2. Баранов И.Е., Калинин А.А., Коробцев С.В., Островский С.В., Порембский В.И., Фатеев В.Н., Каргопольцев А. Силовые установки для БПЛА на топливных элементах: перспективы применения // Энергия: экономика, техника, экология. 2014. № 4. С. 31.
3. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. Кикоина И.К. М.: Атомиздат, 1976.
4. Хейфец Л.И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых средах. М.: Химия, 1982.
5. Баранов И.Е., Белоглазов В.Ю., Николаев И.И. Перенос реагентов в газодиффузионных слоях ТПТЭ и явление затопления электрода. / В сб.: Материалы 2-го Международного Форума «Водородные технологии для развивающегося мира». Москва, 2008.
6. Григорьев С.А., Лютикова Е.К., Марусева И.В., Пименов В.В., Пресняков М.Ю., Фатеев В.Н. Наноструктурные электрокатализаторы на основе платины и никеля для топливных элементов с твердым полимерным электролитом, синтезированные магнетронно-ионным распылением в импульсном режиме // Альтернативная энергетика и экология – ISJAE. 2014. № 19. С. 107-116.

References

1. Baranov I.E., Fateev V.N., Poremskij V.I., Kalinnikov A.A. Aviacionnaâ silovaâ ustanovka na vodorodovozdušnyh tverdogopolimernyh toplivnyh èlementah // Transport na al'ternativnom toplive. 2015. № 3(45).
2. Baranov I.E., Kalinnikov A.A., Korobcev S.V., Ostrovskij S.V., Poremskij V.I., Fateev V.N., Kargopol'cev A. Silovye ustanovki dlâ BPLA na toplivnyh èlementah: perespektivy primeniâ // Ènergiâ: èkonomika, tehnikâ, èkologiâ. 2014. № 4. S. 31.
3. Tablicy fizičeskih veličin. Spravočnik. Pod red. Kikoina I.K. M.: Atomizdat, 1976.
4. Hejfec L.I., Nejmark A.V. Mnogofaznye processy v poristyh sredah. M.: Himiâ, 1982.
5. Baranov I.E., Beloglazov V.Û., Nikolaev I.I. Perenos reagentov v gazodiffuzionnyh sloâh TPTÈ i âvlenie zatopleniâ èlektroda. / V sb.: Materialy 2-go Meždunarodnogo Forumâ «Vodorodnye tehnologii dlâ razvivaûšegosâ mira». Moskva, 2008.
6. Grigor'ev S.A., Lûtikova E.K., Maruseva I.V., Pimenov V.V., Presnâkov M.Û., Fateev V.N. Nanostrukturnye èlektrokatalizatory na osnove platiny i nikelâ dlâ toplivnyh èlementov s tverdym polimernym èlektrolitom, sintezirovannye magnetronno-ionnym raspyleniem v impul'snom režime // Al'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ – ISJAE. 2014. № 19. S. 107-116.

Транслитерация по ISO 9:1995

