

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Константин Владимирович АГАПОВ¹

Дмитрий Олегович ДУНИКОВ²

Кирилл Дмитриевич КУЗЬМИН³

Евгений Викторович СТОЯНОВ⁴

УДК 621.352.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ПОВЫШЕНИЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В ТВЕРДОПОЛИМЕРНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ С ЖИДКОСТНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

¹ аспирант, Национальный исследовательский университет,
Московский энергетический институт;
инженер, ИнЭнерджи (г. Москва)
agapovkv@mail.ru; ORCID: 0000-0001-8009-3080

² кандидат физико-математических наук, доцент,
Национальный исследовательский университет,
Московский энергетический институт;
старший научный сотрудник,
Объединенный институт высоких температур РАН (г. Москва)
ddo@mail.ru; ORCID: 0000-0002-2238-5605

³ инженер, ИнЭнерджи (г. Москва)
k.kuzmin@inenergy.ru

⁴ инженер, ИнЭнерджи (г. Москва)
e.stoyanov@inenergy.ru

Цитирование: Агапов К. В. Исследование особенностей функционирования и повышение влагосодержания в твердополимерных топливных элементах с жидкостным охлаждением / К. В. Агапов, Д. О. Дуников, К. Д. Кузьмин, Е. В. Стоянов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Том 6. № 2 (22). С. 8-21.

DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-2-8-21

Аннотация

В настоящей публикации, помимо упора на инженерную составляющую в создании собственного испытательного стенда для отработки различных режимов и общей работоспособности твердополимерных топливных элементов с электрической мощностью свыше 2 кВт, выносятся на обозрение особенности результата работы топливного элемента с жидкостным охлаждением в области теплообмена. Известно, что от правильно отстроенного водяного и теплового баланса топливного элемента зависит его производительность и срок службы. Описана проблемная область в недостаточном влагосодержании подаваемого воздуха в топливный элемент и переизбытке тепла в топливном элементе. При этом отрицательным последствием является то, что создается дополнительное сопротивление скорости электрохимической реакции, вследствие чего уменьшается вырабатываемая мощность. Предложен возможный путь решения данной проблемы: так, согласно уравнению теплового баланса, путем увеличения перепада температур между входящим и выходящим теплоносителем можно отводить больше тепловой энергии. Разница температур достигалась с помощью использования водо-воздушного радиатора. Повышенный отвод тепловой энергии позволил сконденсировать часть влаги внутри топливного элемента, поддерживая влажность и проводимость мембраны, но не допуская при этом затопления каналов жидкой водой, что в противном случае могло бы привести к снижению производительности. Во время испытаний удалось осуществить прирост снимаемой мощности на 321 Вт, что составляет 8,4% сверх максимальной мощности. На основании полученных экспериментальных результатов были построены зависимости, которые выражаются вольт-амперной характеристикой, мощностной кривой, количеством тепла, отводимого водой от топливного элемента, и графиком изменения температуры воды на входе и выходе из топливного элемента на различных этапах работы.

Ключевые слова

Теплообмен, водный баланс, водородная энергетика, твердополимерный топливный элемент, водород, влажный воздух.

DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-2-8-21

Введение

Хотя топливные элементы с твердополимерным электролитом (ТПТЭ) уже применяются в автономной энергетике, работы по улучшениям как их удельных характеристик, так и отдельных компонентов продолжают. Данная ветвь водородной энергетике обладает следующими достоинствами: высокой плотностью мощности, высоким значением КПД, низкой рабочей температурой, быстрым запуском системы, отсутствием вредных выбросов в атмосферу и большим сроком службы [14, 16]. Несмотря на это, следует отметить и недостатки. Так, например, на текущем этапе рынок энергоустановок на основе топливных элементов сдерживают следующие факторы:

- а) высокая стоимость топливных элементов. Окончательная стоимость определяется также и стоимостью остального оборудования в энергоустановках на ТПТЭ и добавленной стоимостью. Примерные цены самой системы: 40-55 \$ в расчете на 1 кВт установленной мощности [13];
- б) отсутствие повсеместной доступности топлива. Если газовая инфраструктура относительно хорошо развита, то трубопроводов с водородом или практически нет, или же они располагаются только в специальных закрытых объектах. В России для лабораторных испытаний обычно используется водород из баллонов или полученный прямо на месте посредством электролиза, риформинга углеводородов. Поиск способов производства недорогого водорода и его хранения является актуальной задачей для перехода на водородную энергетику [2, 19];
- в) конструктивные проблемы при переходе от портативных классов топливных элементов (10-500 Вт) до киловаттных (2-30 кВт) [7]. При этом переходе меняется и геометрия внутренних каналов топливных элементов, и технические устройства в энергоустановках. ТПТЭ мощностью 5 кВт и, допустим, 10-20 кВт различаются в большей степени лишь габаритными параметрами, расходом и практически линейно масштабируются (конечно, при условии сохранения равномерного распределения газов, охлаждающей жидкости по каналам и небольшого роста потерь напора [3]).

Твердополимерный топливный элемент в основном состоит из нескольких мембранно-электродных блоков, соединенных вместе, которые, в свою очередь, состоят из анода и катода, разделенных протон-проводящей полимерной мембраной [6, 8]. Поступая на анодную часть, водород разделяется на протоны и электроны. Первые проходят сквозь мембрану на катодную часть, туда, куда поступает кислород (воздух). Электроны же идут во внешнюю цепь и тем самым создают полезную электрическую работу. Важную роль в работе ТПТЭ играет влажность: именно благодаря содержанию внутри полимерной мембраны воды осуществляется транспорт протонов.

Производительность и срок службы ТПТЭ во многом определяются рабочей температурой, с ее ростом улучшается кинетика электрохимических процессов в мембранно-электродных блоках [17]. Поэтому наиболее предпочтительным для работы ТПТЭ считается диапазон от 40 до 80 °С [11]. Обеспечение эффективного теплового режима работы позволяет существенно повысить срок службы. Стабильный тепловой и водный баланс топливного элемента можно расценивать как два ключевых фактора обеспечения хорошей производительности энергоустановки на основе ТПТЭ [18], поэтому логично, что они неразрывно связаны между собой. Избыточное тепловыделение в мембранно-электродном блоке приводит к работе при повышенной температуре, мембрана начинает пересыхать, при этом влагосодержание снижается, а значит, протонная проводимость падает. Как уже было сказано ранее, блокирование транспорта для протонов приводит к снижению вырабатываемой мощности посредством снижения электрохимического потенциала [5, 9]. В случае, когда происходит

скапливание излишней воды в полимерной мембране ввиду нарушения режима эксплуатации, неправильного расчета геометрии каналов или же каких-то иных факторов, при которых вода не может эффективно утилизироваться, транспорт водорода и воздуха к мембране оказывается частично заблокирован избытком воды в жидкой, газообразной либо дисперсной фазе, соответственно, мембранно-электродный блок уже не может эффективно работать [12].

Для соблюдения экономии топлива и максимального получения электрической энергии работа топливного элемента может происходить при так называемом закрытом режиме [4]. Выход с анодной магистрали ТПТЭ закрыт электромагнитным клапаном, который открывается только на определенный промежуток времени и через определенные интервалы времени (к примеру, раз в 23 с на 300 мс) для периодической продувки и выброса влаги в атмосферу. Однако тут существует риск топливного голодания, т. е. нехватки топлива, т. к. из-за закрытого выхода продуктам электрохимической реакции (воде) некуда утилизироваться, в связи с чем происходит неустойчивая работа и деградация мембрано-электродных блоков [10, 15].

С учетом вышесказанного целью данной научной работы является показ влияния неправильного теплового и водного баланса на характер работы топливного элемента, а также исследование касательно оптимизации его режима работы.

Методика эксперимента и ход работы

Тестируемый твердополимерный топливный элемент с жидкостным охлаждением состоит из 47 мембранно-электродных блоков. Общая схема испытательного стенда показана на рис. 1. Ход эксперимента заключался в следующем: в качестве источника водорода использовался стандартный баллон высокого давления объемом 40 л с давлением водорода около 150 бар. Водород был марки А, его чистота соответствовала ГОСТ 3022-80: не менее 99,99% объемных долей водорода в пересчете на сухой воздух [1]. На вентиль баллона устанавливался двухступенчатый регулятор давления A-Flow, у которого выставлялось давление не менее 0,165 бар и не более 0,21 бар. Поток газа измерялся с помощью регулятора потока фирмы Burkert. Воздух нагнетался посредством вентилятора, обороты и расход которого можно было регулировать напряжением питания. Однако т. к. данный вентилятор создает достаточно низкое избыточное давление (при своей загрузке на 70% — всего 0,075 бар), он был загружен практически всегда на 90-95%, в результате давление всегда было около 0,118 бар. Так было сделано для того, чтобы сохранить небольшую разницу в давлениях между водородом и воздухом, т. к. это требуется для нормального режима работы. Давление водорода должно быть несколько больше давления воздуха, ведь иначе на транспорте протонов к полимерной мембране будет сказываться дополнительное сопротивление со стороны воздуха.

Для охлаждения ТПТЭ использовалась дистиллированная вода с электропроводностью не более 0,070-0,088 мкСм/см, полученная с помощью системы

водоподготовки «Спектр». С помощью циркуляционного насоса данная охлаждающая вода циркулировала по замкнутому контуру, проходя непосредственно внутри ТПТЭ по специальному каналу и тем самым забирая избыточное тепло; расход воды при этом составлял 6,4 л/мин.

На входящих и выходящих линиях водорода, воздуха и воды были установлены датчики давления Wika (на рис. 1 изображены как PE) с погрешностью

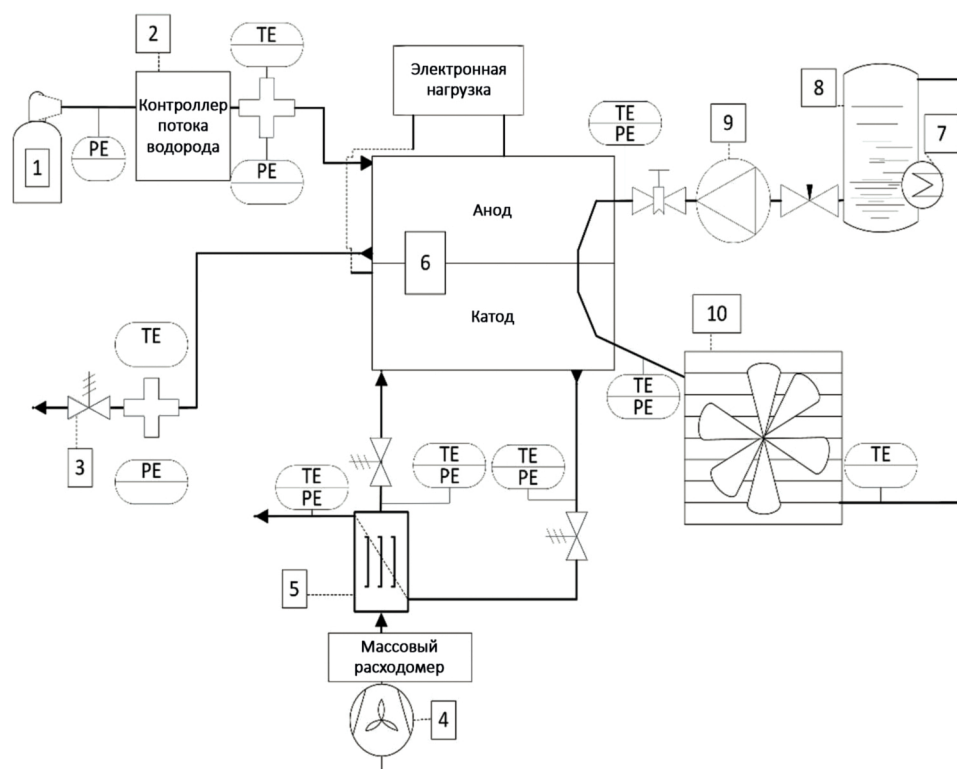


Рис. 1. Схема испытательного стенда:

- 1 — баллон с водородом,
- 2 — контроллер потока водорода,
- 3 — электромагнитный клапан продувки,
- 4 — вентилятор,
- 5 — мембранный увлажнитель,
- 6 — топливный элемент,
- 7 — термоэлектрический нагреватель мощностью 2 кВт,
- 8 — бак с водой объемом 18 л,
- 9 — циркуляционный насос воды,
- 10 — вентилятор с радиатором

Fig. 1. Experimental stand:

- 1 — hydrogen tank,
- 2 — mass flow controller of hydrogen,
- 3 — electromagnetic valve for purge,
- 4 — air blower,
- 5 — humidifier,
- 6 — proton-exchange membrane fuel cell (PEMFC),
- 7 — heater (2 kW),
- 8 — water reservoir (18 l),
- 9 — water pump,
- 10 — heat exchanger

измерения $\pm 0,03$ бар, датчики температуры Wika (на рис. 1 изображены как ТЕ) с погрешностью измерения $\pm 0,15$ °С. Помимо этого, входящий воздух в ТПТЭ увлажнялся выходящим из ТПТЭ воздухом с помощью внешнего мембранного увлажнителя, т. к. воздух в ТПТЭ должен поступать уже влажным. В качестве потребителя мощности от топливного элемента была выбрана электронная программируемая нагрузка АКИП 1384/8. Работа с нагрузкой происходила в режиме задания значений постоянного тока, остальные же параметры, а именно напряжение и мощность, варьировались. Погрешность при режиме постоянного тока составляла $\pm(0,05\% \cdot I_{\text{установка}} + 0,1\% \cdot I_{\text{конечн}})$.

К преимуществам топливных элементов с водяным охлаждением можно отнести более эффективный отвод избыточного тепла (водой, а не воздухом), что позволяет снимать максимальное количество электрической энергии, балансируя между параметрами охлаждающего агента (расходом, температурой входа теплоносителя и т. д.) и поддерживая работу топливного элемента в оптимальном для него режиме. Вентилятор радиатора охлаждения выходящей воды из ТПТЭ работал таким образом, чтобы поддерживать требуемую температуру на входе в ТПТЭ. Охлаждающая вода, которая вначале, перед подачей в ТПТЭ, нагревается до 65 °С, с увеличением вырабатываемой мощности (как электрической, так и тепловой) подогревается до 70 °С. При этом значении наблюдается наиболее равномерное распределение температуры по топливному элементу. После выхода из ТПТЭ вода имеет чуть большую температуру. Затем, охладившись в радиаторе, она попадает в сборный резервуар, откуда снова поступает на вход в ТПТЭ.

Результаты эксперимента, а именно зависимости напряжения от изменения тока $U(I)$ и мощности от изменения тока $P(I)$, показаны на рис. 2. Мощность вычислялась по следующей формуле:

$$P_i = U_i \cdot I_i, \quad (1)$$

где i — значение величины в определенный момент времени.

По оси абсцисс отложено условное время эксперимента, по левой оси ординат — значения напряжения тока, а по правой — мощности.

Ввиду высокого напряжения холостого хода (когда ток в цепи отсутствует) и высокого напряжения ТПТЭ при работе до 20 А, увеличивается скорость деградации мембранно-электродных блоков. Скорость деградации увеличивается, когда на каком-то одном мембранно-электродном блоке напряжение выше 0,8 В, т. к. внутри ТПТЭ может образовываться блокирующий оксидный слой. Поэтому данный ТПТЭ рассчитан на быстрый старт системы (до одной минуты запуска) и выход на рабочие условия в пределах 40-60% от максимальной мощности. Однако для быстрого запуска на 40-60% от максимальной мощности воздух и воду необходимо нагревать перед подачей, т. к. рабочая температура ТПТЭ составляет 65-75 °С.

Сам ход эксперимента на рис. 2 можно разделить на три этапа, которые отмечены зонами I, II и III соответственно и разделены вертикальной чертой. На первом этапе максимально достигнутое значение снимаемого тока равнялось 128 А,

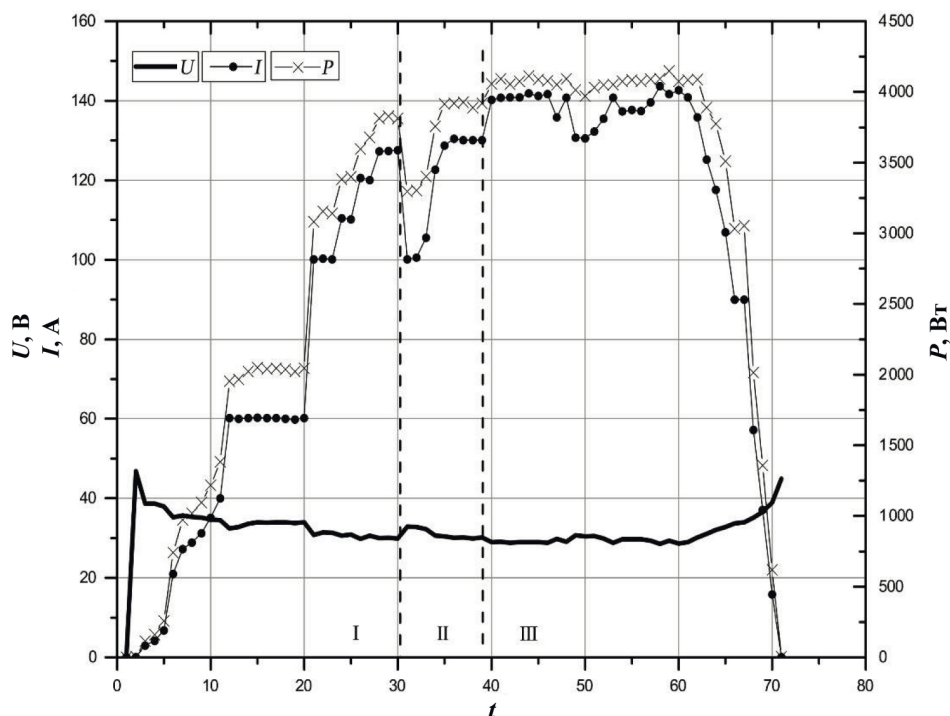


Рис. 2. Вольт-амперная и мощностная характеристика исследуемого ТПТЭ

Fig. 2. Volt-ampere and power curves of the PEMFC

при этом мощность была 3 827 Вт, а уставка температуры воды на входе в ТПТЭ — 70 °С. На втором этапе снимаемый ток временно снизили и понизили уставку температуры воды. Объяснить это можно тем, что подаваемый в ТПТЭ воздух имел температуру за рекомендуемой верхней границей и пониженное влагосодержание, поэтому снижение температуры входящей воды позволило снизить переизбыток тепла в ТПТЭ и равномерно распределить температуру. Второй этап заканчивается тогда, когда ток опять становится приблизительно таким же. И наконец, третий этап показан резким возрастанием снимаемого тока. Благодаря снижению уставки температуры охлаждающей воды удалось увеличить ток до 142 А, а напряжение сохранить примерно на этом же уровне. Мощность же при таком токе составила уже 4 148 Вт, что на 321 Вт выше первоначально полученного значения мощности. Конечные изменения по току, начиная по оси абсцисс со значения 45, можно объяснить практическим интересом в этом диапазоне к снимаемой максимальной мощности, а именно к тому, как резкое изменение тока будет влиять на показатели температур, количество удаляемой влаги, отклик экспериментального оборудования на «стрессовые» ситуации и саму работоспособность ТПТЭ в таком режиме. В целом получается, что в режиме колебаний тока не наблюдалось явного процесса химической деградации, т. к. напряжение хоть

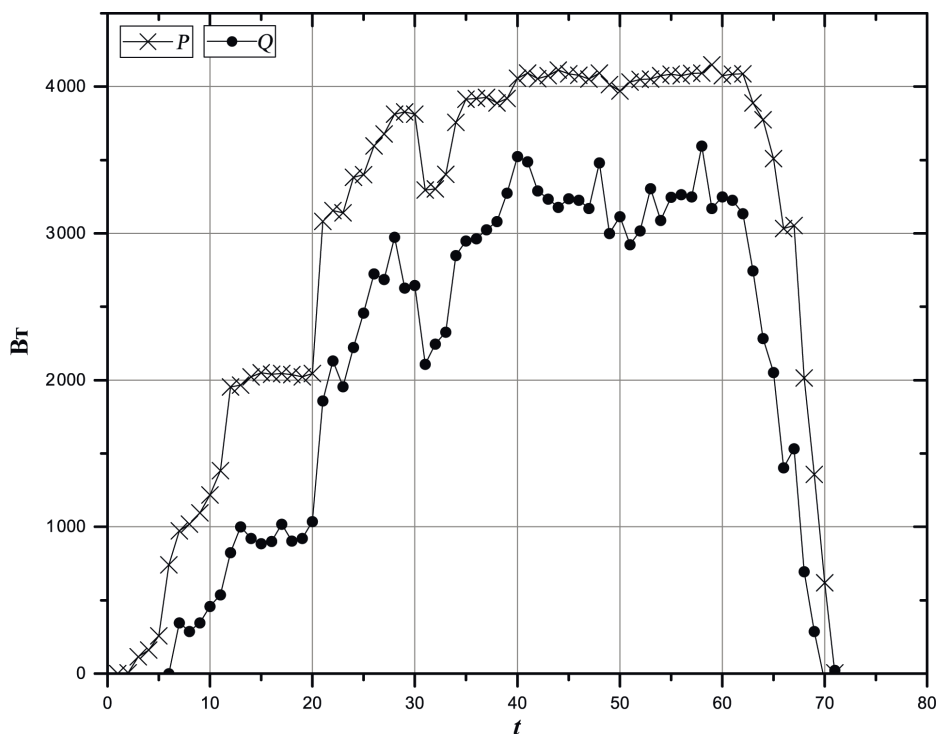


Рис. 3. Вырабатываемая ППТЭ электрическая энергия (P , Вт) и отводимая водой тепловая энергия (Q , Вт)

Fig. 3. Power curve generated by the PEMFC (P , W) and the amount of heat energy taken away by cooling water (Q , W)

и изменяется, но не имеет резкого падения. Поэтому можно полагать, что понижение температуры входящей воды не ухудшает саму работу ППТЭ.

Т. к. в результате реакции водорода с кислородом (воздухом) образуется вода, то отвод избытка тепла помогает поддержать ППТЭ в увлажненном состоянии, т. е. часть воды, находясь в газообразном состоянии, конденсируется, а значит, меньшее количество водяного пара удаляется вместе с непрореагировавшим воздухом.

Рис. 3 демонстрирует количество отводимой тепловой энергии охлаждающей водой. Для сравнения на данном рисунке приводится и количество снимаемой электрической энергии с ППТЭ. Уравнение теплового баланса со стороны охлаждающей воды:

$$Q = G \cdot c_p \cdot (t_{\text{в. вых}} - t_{\text{в. вх}}), \quad (2)$$

где G — расход воды, кг/с; c_p — удельная теплоемкость воды, Дж/(кг · К); $t_{\text{в. вых}}$ и $t_{\text{в. вх}}$ — температура воды на выходе и входе соответственно, °С.

Разница температур воды между входом и выходом на протяжении всего эксперимента показана на рис. 4.

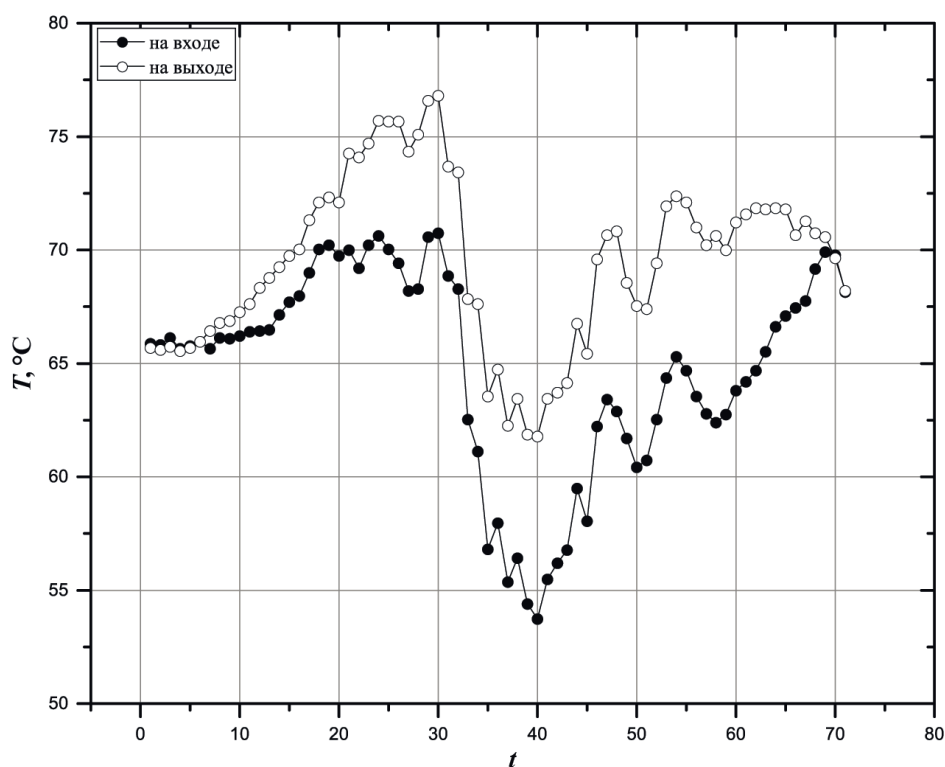


Рис. 4. Температура охлаждающей воды:

● — на входе в ТПТЭ,
○ — на выходе из ТПТЭ

Fig. 4. Temperatures of the cooling water in PEMFC:

● — input,
○ — output

Факт того, что отводимая тепловая энергия получилась меньше вырабатываемой электрической (по ваттам), можно объяснить расходом части энергии на нагрев самого топливного элемента без учета потерь в окружающую среду. Следует заметить, что сильно понижать входящую температуру охлаждающей воды нельзя, т. к. в таком случае влага в воздушной магистрали будет конденсироваться прямо в ТПТЭ и сильно тормозить электрохимическую реакцию. Однако в ходе эксперимента удалось осуществить прирост мощности.

Также интересно отметить, что во время резкого увеличения снимаемого тока наблюдается вместе с этим и резкое увеличение количества отводимой тепловой энергии (рис. 2 и 3).

Заключение

Была проведена теоретическая и экспериментальная работа по исследованию работоспособности твердополимерного топливного элемента киловаттного класса мощности. Построены графики вольт-амперной характеристики и мощ-

ностной кривой исследуемого топливного элемента. Было выявлено, что в условиях повышенной температуры воздуха, поступающего в топливный элемент, унос влаги изнутри выше, чем полагается, что приводит к уменьшению скорости электрохимической реакции. Увеличение разницы температур между входом и выходом охлаждающего теплоносителя с помощью радиатора позволило отвести избыточное тепло от топливного элемента. В этом случае часть влаги находилась в жидком состоянии, продолжая поддерживать электрохимическую реакцию на достаточном уровне.

В результате эксперимента при наблюдении теплового режима удалось получить прирост мощности на 321 Вт, что еще раз подтверждает: от правильного теплового режима зависит работоспособность топливного элемента. Также был построен график отводимой водой тепловой мощности, на котором видно, как изменяется динамика количества отводимого тепла: во время увеличения значения тока увеличивается тепловая мощность. Это необходимо учитывать при работе во избежание перегрева, т. к. быстрый рост тока может привести к всплеску избытка тепла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 3022-80. Водород технический. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1980. 26 с.
2. Полякова Т. В. Состояние и перспективы развития водородной энергетики / Т. В. Полякова // Вестник МГИМО-Университета. 2012. № 1. С. 156-164.
3. Afshari E. Numerical investigation on a novel zigzag-shaped flow channel design for cooling plates of PEM fuel cells / E. Afshari, M. Ziaei-Rad, M. M. Dehkordi // Journal of the Energy Institute. 2017. Vol. 90. No. 5. Pp. 752-763. DOI: 10.1016/j.joei.2016.07.002
4. Alizadeh E. The experimental analysis of a dead-end H₂/O₂ PEM fuel cell stack with cascade type design / E. Alizadeh, M. Khorshidian, S. H. M. Saadat, S. M. Rahgoshay, M. Rahimi-Esbo // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42. No. 16. Pp. 11662-11672. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.03.094
5. Aslam R. M. Simultaneous thermal and visual imaging of liquid water of the PEM fuel cell flow channels / R. M. Aslam, D. B. Ingham, M. S. Ismail, K. J. Hughes, L. Ma, M. Pourkashanian // Journal of the Energy Institute. 2019. Vol. 92. No. 2. Pp. 311-318. DOI: 10.1016/j.joei.2018.01.005
6. Asri N. F. Coating of stainless steel and titanium bipolar plates for anticorrosion in PEMFC: a review / N. F. Asri, T. Husaini, A. B. Sulong, E. H. Majlan, W. R. W. Daud // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42. No. 14. Pp. 9135-9148. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.06.241
7. Devrim Y. Development of 500 W PEM fuel cell stack for portable power generators / Y. Devrim, H. Devrim, I. Eroglu // International Journal of Hydrogen Energy. 2015. Vol. 40. No. 24. Pp. 7707-7719. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.02.005
8. Heinzl A. Fuel cells — proton-exchange membrane fuel cells. Bipolar plates / A. Heinzl, F. Mahlendorf, C. Jansen // Encyclopedia of Electrochemical Power Sources / ed. J. Garche. Elsevier, 2009. Pp. 810-816. DOI: 10.1016/B978-044452745-5.00226-4

9. Liang P. Contact resistance prediction of proton exchange membrane fuel cell considering fabrication characteristics of metallic bipolar plates / P. Liang, D. Qiu, L. Peng, P. Yi, X. Lai, J. Ni // *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 169. Pp. 334-344. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.05.069
10. Liu H.-H. Modeling and design of air-side manifolds and measurement on an industrial 5-kW hydrogen fuel cell stack / H.-H. Liu, C.-H. Cheng, K.-L. Hsueh, C.-W. Hong // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42. No. 30. Pp. 19216-19226. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.057
11. Liu L. An overview of the proton conductivity of nafion membranes through a statistical analysis / L. Liu, W. Chen, Y. Li // *Journal of Membrane Science*. 2016. Vol. 504. Pp. 1-9. DOI: 10.1016/j.memsci.2015.12.065
12. Misran E. Water transport characteristics of a PEM fuel cell at various operating pressures and temperatures / E. Misran, N. S. M. Hassan, W. R. W. Daud, E. H. Majlan, M. I. Rosli // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013. Vol. 38. No. 22. Pp. 9401-9408. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.12.076
13. Moreno N. G. Approaches to polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFCs) and their cost / N. G. Moreno, M. C. Molina, D. Gervasio, J. F. Pérez-Robles // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 52. Pp. 897-906. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.157
14. Saeeda W. Modeling and analysis of renewable PEM fuel cell system / W. Saeeda, G. Warkozek // *Energy Procedia*. 2015. Vol. 74. Pp. 87-101. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.527
15. Shih N.-C. Development of a 20 kW generic hybrid fuel cell power system for small ships and underwater vehicles / N.-C. Shih, B.-J. Weng, J.-Y. Lee, Y.-C. Hsiao // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014. Vol. 39. No. 25. Pp. 13894-13901. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.01.113
16. Subin K. Experimental study on self-humidified operation in PEM fuel cells / K. Subin, P. K. Jithesh // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2018. Vol. 27. Pp. 17-22. DOI: 10.1016/j.seta.2018.03.004
17. Tu Z. Evaluation of 5 kW proton exchange membrane fuel cell stack operated at 95 °C under ambient pressure / Z. Tu, H. Zhang, Z. Luo, J. Liu, Z. Wan, M. Pan // *Journal of Power Sources*. 2013. Vol. 222. Pp. 277-281. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.08.081
18. Wan Z. In situ temperature measurement in a 5 kW-class Proton Exchange Membrane Fuel Cell stack with pure oxygen as the oxidant / Z. Wan, J. Shen, H. Zhang, Z. Tu, W. Liu // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 75. Pp. 231-234. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.075
19. Yang L. HIES: cases for hydrogen energy and I-Energy / L. Yang, P. Xie, R. Zhang, Y. Cheng, B. Cai, R. Wang // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. No. 56. Pp. 29785-29804. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.056

Konstantin V. AGAPOV¹
Dmitriy O. DUNIKOV²
Kirill D. KUZMIN³
Evgeniy V. STOYANOV⁴

UDC 621.352.6

A STUDY OF WORK AND IMPROVE OF WATER CONTENT IN PEMFC WITH LIQUID COOLING

¹ Postgraduate Student, National Research University,
Moscow Power Engineering Institute;
Engineer, InEnergy LLC (Moscow)
agapovkv@mail.ru; ORCID: 0000-0001-8009-3080

² Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor,
National Research University, Moscow Power Engineering Institute;
Senior Research Officer, Joint Institute for High Temperatures RAS (Moscow)
ddo@mail.ru; ORCID: 0000-0002-2238-5605

³ Engineer, InEnergy LLC (Moscow)
k.kuzmin@inenergy.ru

⁴ Engineer, InEnergy LLC (Moscow)
e.stoyanov@inenergy.ru

Abstract

In this publication, in addition to focusing on the engineering component in creating our own test bench for trying various modes and the overall performance of solid polymer fuel cells with electric power of more than 2 kW, the features of the result of the operation of a liquid-cooled fuel cell in the field of heat transfer are displayed. It is known that its performance and service life depend on a properly tuned water and thermal balance of the fuel cell. The problem area is described in the insufficient moisture content of the supplied air to the fuel cell and the excess heat in the fuel cell. In this case, the negative consequence is that additional

Citation: Agapov K. V., Dunikov D. O., Kuzmin K. D., Stoyanov E. V. 2020. "A study of work and improve of water content in PEMFC with liquid cooling". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 6, no. 2 (22), pp. 8-21.
DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-2-8-21

resistance to the rate of the electrochemical reaction is created, as a result of which the generated power decreases. A possible way to solve this problem is proposed: so, according to the heat balance equation, by increasing the temperature difference between the incoming and outgoing heat carrier, more heat energy can be removed. The temperature difference was achieved using a water-air radiator. The increased removal of thermal energy allowed the condensation of part of the moisture inside the fuel cell, maintaining the humidity and conductivity of the membrane, but not allowing flooding of the channels with liquid water, which otherwise could lead to a decrease in performance. During the tests, it was possible to increase the removed power by 321 W, which is 8.4% in excess of the maximum power. Based on the obtained experimental results, dependencies were constructed that are expressed by the current-voltage characteristic, power curve, the amount of heat removed by the water from the fuel cell, and a graph of the change in water temperature at the inlet and outlet of the fuel cell at various stages of operation.

Keywords

Heat transfer, water balance, hydrogen energy, proton-exchange membrane fuel cell, hydrogen, humidity air.

DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-2-8-21

REFERENCES

1. GOST 3022-80. 1980. Technical Hydrogen. Technical Conditions. Moscow: Izdatelstvo standartov. 26 pp. [In Russian]
2. Polyakova T. V. 2012. "Status and prospects of hydrogen energy development". Vestnik MGIMO University, no. 1, pp. 156-164. [In Russian]
3. Afshari E., Ziaei-Rad M., Dehkordi M. M. 2017. "Numerical investigation on a novel zigzag-shaped flow channel design for cooling plates of PEM fuel cells". Journal of the Energy Institute, vol. 90, no. 5, pp. 752-763. DOI: 10.1016/j.joei.2016.07.002
4. Alizadeh E., Khorshidian M., Saadat S. H. M., Rahgoshay S. M., Rahimi-Esbo M. 2017. "The experimental analysis of a dead-end H₂/O₂ PEM fuel cell stack with cascade type design". International Journal of Hydrogen Energy, vol. 42, no. 16, pp. 11662-11672. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.03.094
5. Aslam R. M., Ingham D. B., Ismail M. S., Hughes K. J., Ma L., Pourkashanian M. 2019. "Simultaneous thermal and visual imaging of liquid water of the PEM fuel cell flow channels". Journal of the Energy Institute, vol. 92, no. 2, pp. 311-318. DOI: 10.1016/j.joei.2018.01.005
6. Asri N. F., Husaini T., Sulong A. B., Majlan E. H., Daud W. R. W. 2017. "Coating of stainless steel and titanium bipolar plates for anticorrosion in PEMFC: a review". International Journal of Hydrogen Energy, vol. 42, no. 14, pp. 9135-9148. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.06.241
7. Devrim Y., Devrim H., Eroglu I. 2015. "Development of 500 W PEM fuel cell stack for portable power generators". International Journal of Hydrogen Energy, vol. 40, no. 24, pp. 7707-7719. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.02.005

8. Heinzl A., Mahlendorf F., Jansen C. 2009. "Fuel cells — proton-exchange membrane fuel cells. Bipolar plates". In: Garcke J. (ed.). 2009. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, pp. 810-816. Elsevier. DOI: 10.1016/B978-044452745-5.00226-4
9. Liang P., Qiu D., Peng L., Yi P., Lai X., Ni J. 2018. "Contact resistance prediction of proton exchange membrane fuel cell considering fabrication characteristics of metallic bipolar plates". *Energy Conversion and Management*, vol. 169, pp. 334-344. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.05.069
10. Liu H.-H., Cheng C.-H., Hsueh K.-L., Hong C.-W. 2017. "Modeling and design of air-side manifolds and measurement on an industrial 5-kW hydrogen fuel cell stack". *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 30, pp. 19216-19226. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.057
11. Liu L., Chen W., Li Y. 2016. "An overview of the proton conductivity of nafion membranes through a statistical analysis". *Journal of Membrane Science*, vol. 504, pp. 1-9. DOI: 10.1016/j.memsci.2015.12.065
12. Misran E., Hassan N. S. M., Daud W. R. W., Majlan E. H., Rosli M. I. 2013. "Water transport characteristics of a PEM fuel cell at various operating pressures and temperatures". *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 22, pp. 9401-9408. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.12.076
13. Moreno N. G., Molina M. C., Gervasio D., Pérez-Robles J. F. 2015. "Approaches to polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFCs) and their cost". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 897-906. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.157
14. Saeeda W., Warkozek G. 2015. "Modeling and analysis of renewable PEM fuel cell system". *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 87-101. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.527
15. Shih N.-C., Weng B.-J., Lee J.-Y., Hsiao Y.-C. 2014. "Development of a 20 kW generic hybrid fuel cell power system for small ships and underwater vehicles". *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 25, pp. 13894-13901. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.01.113
16. Subin K., P. Jithesh K. 2018. "Experimental study on self-humidified operation in PEM fuel cells". *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 27, pp. 17-22. DOI: 10.1016/j.seta.2018.03.004
17. Tu Z., Zhang H., Luo Z., Liu J., Wan Z., Pan M. 2013. "Evaluation of 5 kW proton exchange membrane fuel cell stack operated at 95 °C under ambient pressure". *Journal of Power Sources*, vol. 222, pp. 277-281. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.08.081
18. Wan Z., Shen J., Zhang H., Tu Z., Liu W. 2014. "In situ temperature measurement in a 5 kW-class Proton Exchange Membrane Fuel Cell stack with pure oxygen as the oxidant". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 75, pp. 231-234. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.075
19. Yang L., Xie P., Zhang R., Cheng Y., Cai B., Wang R. 2019. "HIES: cases for hydrogen energy and I-Energy". *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 56, pp. 29785-29804. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.056