

УДК 621.352.6

## Повышение стабильности работы и долговечности энергоустановки на топливных элементах

К.В. Агапов<sup>1,2</sup>, Д.О. Дуников<sup>2,3</sup>, М.А. Климова<sup>2</sup>, К.Д. Кузьмин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ООО «ИнЭнерджи», Москва, 115201, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Россия

<sup>3</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412, Россия

e-mail: agapovkv@mail.ru; ddo@mail.ru; klimovat\_a@mail.ru; k.kuzmin@inenergy.ru

Поступила в редакцию 25.02.2019

После доработки 03.04.2019

Принята к публикации 04.04.2019

Представлены результаты экспериментального исследования работы автономного источника энергии на топливных элементах, подходящего для портативного и стационарного применения. Создана экспериментальная установка и проведены эксперименты по изучению производительности топливного элемента с твердополимерным электролитом номинальной мощностью 40 Вт при холодном старте. Весь стек прогревался до положительной температуры, чтобы растопить содержащуюся внутри воду. Для прогрева топливного элемента при старте внутри энергоустановки был установлен термоэлектрический нагреватель, что позволило поддерживать положительную температуру выходной магистрали и удалять воду во время продувки вместе с непрореагировавшим водородом. Для обеспечения плавности увеличения нагрузки начальное значение тока составляло 0.05 А. Низковольтных аккумуляторных батарей напряжением 19.2 В оказалось достаточно, чтобы обеспечить плавный запуск топливного элемента. Эксперименты подтвердили устойчивую работу созданной гибридной энергоустановки на топливных элементах.

**Ключевые слова:** водород, твердополимерный топливный элемент, холодный запуск, повышение стабильности работы.

### Введение

В качестве резерва или замены обычного источника питания от электросети для автономного стационарного, портативного, транспортного применения могут быть использованы как аккумуляторные батареи, так и топливные элементы, причем они могут быть объединены в единую систему. Топливные элементы классифицируются по принципу содержащегося в них электролита и особенностей их работы. Выделяют щелочные, твердополимерные с протон-проводящей мембраной, метанольные, на основе фосфорной кислоты, расплав-карбонатные, твердооксидные топливные элементы [1].

Протон-проводящие топливные элементы с твердополимерным электролитом (ТПТЭ) являются перспективным альтернативным источником питания благодаря ряду достоинств: значение КПД выше, чем у дизельных генера-

торов [2]; низкая рабочая температура; низкие показатели вредных выбросов или даже их отсутствие [3]. Этот вид топливных элементов и системы на их основе уже достаточно широко применяются на практике, и на базе реального опыта работы сформулированы основные научно-технические проблемы, связанные с их эксплуатацией. Баланс влаги в мембране является одним из наиболее важных параметров, поскольку от него зависит протонная проводимость, производительность стека и его срок службы. Кроме того, топливные элементы с твердополимерным электролитом чувствительны к чистоте потребляемого водорода, в нем не должно быть серы или оксида углерода [4], которые блокируют активную часть катализатора, в результате чего значительно падает производительность. Поэтому если подаваемый газ содержит указанные примеси, то на входе в уста-

новку ставят десульфатор, селективный окислитель (СО) [5], вводят кислород в анодную область для доокисления до углекислого газа [6]. В то же время степень чистоты водорода из баллонов достаточна, чтобы этих проблем не возникало.

Энергоустановки на основе топливных элементов для стационарного и мобильного применения, в частности в автомобилях, бывает необходимо запускать при низких, в том числе отрицательных, температурах окружающей среды и поддерживать их стабильную работу. Для работы топливных элементов с твердополимерным электролитом важным является наличие воды в мембране для обеспечения ионного транспорта [7, 8], т.е. движения протонов от анода к катоду. Потери в ячейке начинают возникать как при осушении мембраны (происходит повышение сопротивления электролита), так и при избытке влаги в мембране, в этом случае диффузия реагентов ( $H_2/O_2$  (Air)) к месту реакции затруднена [9]. В обоих случаях происходит падение напряжения и снимаемой мощности [10].

Логично заметить, что в условиях низкой температуры вода может кристаллизоваться внутри топливного элемента. Соответственно могут возникнуть нарушения в целостности слоев: усталостное напряжение клеящего компонента, микродырки и пробои мембраны, микротрещины катализатора и газодиффузионного слоя, ускоренная деградация материалов топливных элементов с твердополимерным электролитом и др. Для минимизации возможных повреждений в стекле при температуре менее  $5^\circ C$  после его работы и перед последующей работой желательно удалить большую часть воды продувкой или же запуском инертного газа. Предварительный нагрев перед холодным стартом, а также подача подогретых газов (воздуха и водорода) с температурой более  $20^\circ C$  делают возможным более быстрый процесс запуска [11].

Как отмечается в работе [12], при холодном старте лучше всего разгонять стек маленькими токами. При этом отмечается, что вольт-амперная характеристика имеет плавный вид без резкого снижения. Также сообщается, что лед блокирует активные области мембраны. Чем ниже температура, тем сильнее ее негативное влияние на быстрый запуск стека [13], и так как

жидкая вода образуется довольно быстро из-за выделения омического тепла в результате реакции, то возникающие неоднородности переноса воды по мембране/каталитическому слою имеют тенденцию усиливаться.

Выделяют три механизма образования льда.

1) Температура слоев мембранно-электролитного блока (МЭБ), а именно мембраны и катализатора ( $T_{M/Ca}$ ), примерно равна отрицательной температуре окружающей среды. Тогда вода, образовавшаяся в мембране и каталитическом слое катода и замерзшая там при такой температуре, не может быть удалена, что приводит к блокированию дальнейшего транспорта.

2) Образование льда в газодиффузионном слое (ГДС/GDL). Это происходит, когда  $T_{GDL} < T_{FP} < T_{M/Ca}$ , где  $T_{GDL}$  – температура газодиффузионного слоя,  $T_{FP}$  – температура замерзания воды,  $T_{ch}$  – температура в каналах входа и выхода, т.е. температура в ГДС оказывается меньше температуры точки замерзания воды, в то время как в мембране и каталитических слоях температура выше, и там вода находится в жидком состоянии.

3) Фазовый процесс кристаллизации воды в канале. Это возможно, когда  $T$  (или  $\sim T_{ch}$ )  $< T_{FP} < T_{GDL} < T_{M/Ca}$ . Вода может замерзнуть в каналах входа/выхода водорода, в основных местах входа и выхода воздуха.

Таким образом, самой «теплой» областью является область мембраны и каталитического слоя, основное количество жидкой воды заключено там. По мере удаления от мембраны температура уменьшается и приближается к температуре окружающей среды.

В работе [14] сообщается, что стек с полимерной мембраной имеет хорошие показатели быстрого запуска при температуре среды не ниже  $-5^\circ C$ , и условная граница успешного холодного старта находится в диапазоне  $-7...-10^\circ C$ . Повышение температуры вокруг мембраны и равномерное увеличение нагрузки значительно повышают шансы на успешный запуск [15].

Важную роль играют входные газовые каналы, поскольку их блокирование приводит к просадке рабочих характеристик топливного элемента. Помимо этого важна геометрия каналов: мембранно-электролитный блок с единичным

каналом серпантинного вида устойчив к холодному старту в большей степени из-за легкости отвода влаги [16].

Продувка топливного элемента инертным газом (к примеру, аргоном) должна помочь убрать влагу, оставив минимум в мембране/каталитическом слое/ГДС [17]. Однако при длительном простое топливный элемент будет пересыхать, и при следующем старте не будет обеспечена достаточная протонная проводимость, чтобы достичь мощности свыше 60%. Также на практике организовать подачу аргона в область анода/катода довольно затруднительно, да и оснащение энергоустановки дополнительным баллоном с инертным газом неэффективно. Поэтому предпочтительнее использовать внешний источник нагрева, например, термоэлектрический нагреватель (ТЭН), обдув теплым воздухом, горелку; внутренние способы нагрева – смесь метанола/этанола, гальваностатический режим, потенциостатический режим [18].

Таким образом, можно обозначить следующие действия для холодного старта: нужно либо проводить старт медленно и плавно повышать нагрузку, либо использовать дополнительные способы нагрева. Плавное увеличение нагрузки не всегда возможно, поскольку под-

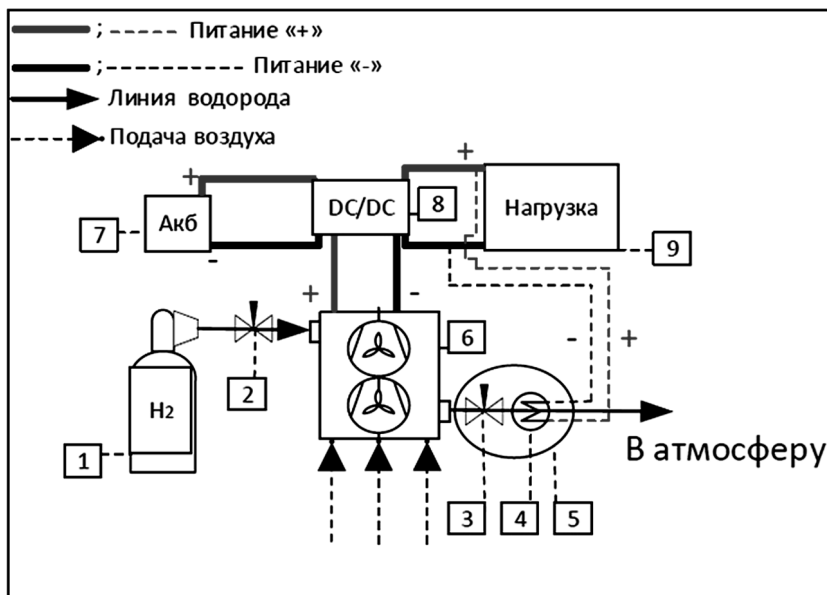
ключаемая к энергоустановке нагрузка имеет необходимое фиксированное значение энергопотребления, поэтому следует использовать гибридную систему из накопителя энергии (аккумуляторной батареи) и генератора электричества (топливного элемента). Создание гибридной системы позволяет снизить мгновенную нагрузку на стек. Эксплуатация топливного элемента может заключаться в работе в номинальном режиме без перепадов мощности с подзарядкой аккумуляторов, которые, в свою очередь, отдают электрическую энергию потребителю. Помимо этого они заметно сглаживают пиковые области [19]. Необходимо отметить, что рабочее напряжение топливного элемента должно быть немногим больше напряжения аккумуляторных батарей, чтобы шел процесс заряда [20–23].

Целью данной работы является проведение экспериментальных исследований запуска твердополимерного топливного элемента в различных температурных режимах, чтобы определить применимость решений проблемы холодного старта и создать систему запуска топливного элемента.

## Экспериментальные исследования

Для проведения серии экспериментов с использованием твердополимерных топливных элементов в компании «ИнЭнерджи» была собрана система, принципиальная схема которой представлена на рис. 1. Водород подавался из баллона (40 литров) с изначальным давлением 150 бар и последующим двухстадийным редуцированием до 0.45–0.5 бар (избыточное давление). В экспериментах использовалась программируемая электронная нагрузка «АКИП 1384/8», помимо электронной нагрузки для измерений использовался мультиметр «Digital Multimeter PM18C».

Поскольку с изменением температуры окружающей среды в отрицательную сторону запуск стека будет сложнее, вольт-амперная и, соответственно, мощностная характеристики бу-



**Рис. 1.** Система для проведения эксперимента: 1 – баллон с водородом и редуктором до 0.45–0.5 бар; 2 – электромагнитный клапан; 3 – электромагнитный клапан (продувочный); 4 – электрический нагреватель; 5 – зона обогрева; 6 – топливный элемент с протоно-обменной мембраной и вентиляторами воздуха; 7 – блок аккумуляторных батарей; 8 – DC/DC преобразователь; 9 – электронная нагрузка для задания и снятия параметров

дут ниже, чем при 15–30 °С. Поэтому было решено сразу добавить электрический нагревательный элемент мощностью 50 Вт в контур при сборке системы, как это показано на рис. 1. Первая серия испытаний проводилась на топливных элементах номинальной мощностью 40 Вт.

Первоначально в лабораторных условиях при температуре окружающей среды 17 °С и относительной влажности 25% определены поляризационная и мощностная кривые испытываемого топливного элемента FC-#1 номинальной мощностью 40 Вт (рис. 2 –  $U_1, I_1, P_1$ ). Схема подключения была упрощена и не включала систему аккумуляторных батарей (АКБ) и DC/DC преобразователь. Система состояла только из нагрузки, топливного элемента с блоком подачи газа и термонагревательного элемента.

Контроль работы топливного элемента дополнительно проверялся тепловизором (Fluke). Было отмечено, что температура по области топливных элементов распределена не совсем равномерно, что не соответствует оптимальной работе. Это связано с тем, что температура и влажность окружающего воздуха были ниже оптимальных условий для испытаний. Два мембранно-электродных блока из стека топливных элементов несколько отличались от других по напряжению, имея потенциал в пределах 0.53–0.55 В. В результате, максимум температур, равный 45.6 °С, находился именно на них. Исходя из тепловой картины, можно заключить, что основное тепловыделение и скорость реакции происходят ближе к центру. Способ-

ствует этому, возможно, наибольший приток воздуха через вентиляторы, что интенсифицирует химическую реакцию, кроме того два вышеуказанных мембранно-электродных блока тоже влияют на данную картину.

Результаты испытаний по запуску при отрицательной температуре окружающей среды (–4 °С) показаны на рис. 2 – кривые для топливного элемента FC-#1 ( $U_2, I_2, P_2$ ). Сравнивая две характеристики на рис. 2, можно заметить, что вначале они идут одинаково с минимальными отклонениями. Существенные различия начинаются в области омических и концентрационных потерь. Вероятнее всего, сказывается недостаточная диффузия газов в электроды из-за блокирования, пониженная температура слоев стека. Хотя запуск производился плавно и скорость увеличения тока была по 0.05 А в 20 с.

Известно, что проводимость полимерной мембраны с ростом температуры до определенного момента увеличивается. Как уже было сказано, первые участки кристаллизации воды находятся там, где температура соответствует температуре окружающей среде (при  $T < 0$  °С и ниже). Появления влаги во входящей магистрали можно не ожидать, поскольку на вход подается сухой водород. С учетом того, что часть воды остается в топливном элементе и поддерживает его в увлажненном состоянии, а часть удаляется продувкой, ТЭН был установлен на выходящей линии анода. ТЭН поддерживает положительную температуру выходящей линии, помогая воде не замерзнуть и не заблоки-

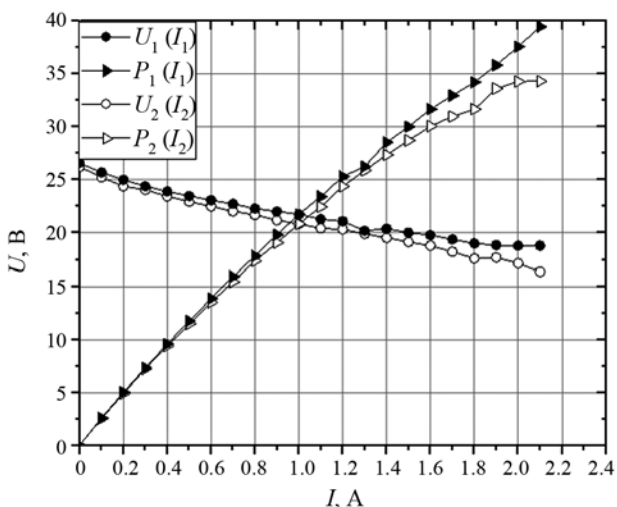


Рис. 2. Вольт-амперные и мощностные зависимости

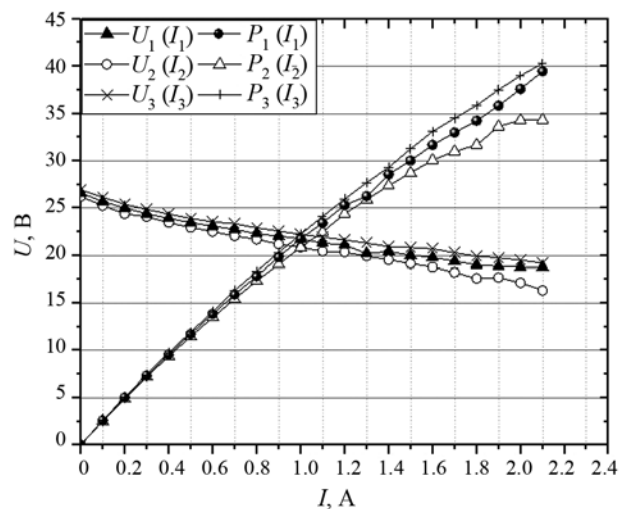


Рис. 3. Вольт-амперные и мощностные зависимости с включенным источником нагрева

ровать канал. Естественно, часть тепла рассеивается рядом с топливным элементом конвекцией. Поскольку топливный элемент работает с открытым катодом, т.е. окружающий воздух напрямую подается на катод вентилятором, то рассеиваемое тепло с ТЭНа нагревает в том числе и окружающий воздух, что можно выразить в условном повышении эффективности работы системы. При этом нет необходимости постоянно держать его включенным, нижняя граница уставки температуры позволяет не расходовать энергию.

На рис. 3 приводятся вольт-амперная и мощностная характеристики топливного элемента с твердополимерным электролитом с запуском при отрицательной температуре окружающей среды ( $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) топливного элемента FC-#1 ( $U_3, I_3, P_3$ ), но при работе запитанного извне нагревателя окружающего воздуха. Термоэлектрический нагреватель позволяет подогреть напрямую выходной водородный канал. Термопара, встроенная в выходную магистраль, измеряла температуру окружающей среды, и в зависимости от показаний температуры воздуха в магистрали термоэлектрический нагреватель автоматически включался и выключался, не давая воде замерзнуть. Температура области вокруг стека поддерживалась не ниже  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Рост характеристик можно объяснить повышением температуры окружающей среды и достаточным увлажнением составляющих топливного элемента. Потенциал мембранно-электродных

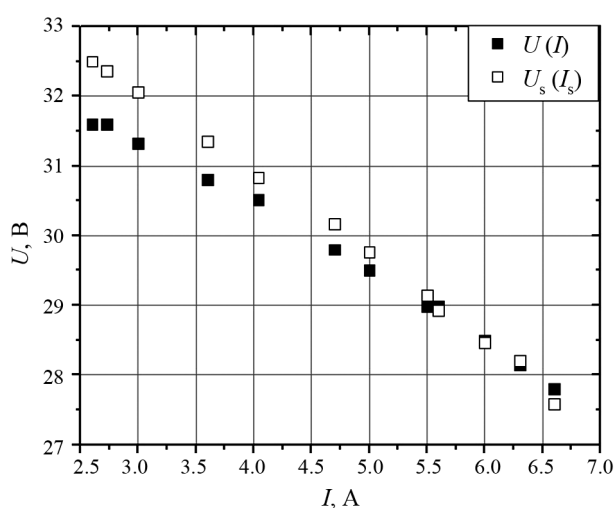


Рис. 4. Сравнение производительности топливного элемента: а  $-U(I)$  при обычном запуске с нагрузкой; б  $-U_s(I_s)$  с аккумуляторными батареями и нагрузкой

блоков был уверенно выше  $0.5\text{ В}$  и для большинства блоков приближался к  $0.62\text{ В}$ .

Продолжительная работа топливного элемента несет в себе несколько недостатков, в том числе небольшую просадку по напряжению из-за скапливания влаги внутри, деградации компонентов и снижения каталитической активности. Если сразу нагружать топливный элемент на номинальную или половинную мощность, то кривая будет иметь вид, как  $U(I)$  на рис. 4. Такие резкие просадки приводят к негативной работе в области массопереноса, особенно в том случае, если топливный элемент долго находился вне работы и часть влаги изнутри испарилась, в результате чего проводимость уменьшается. Просадки в дальнейшем счете могут сказаться на ресурсе и максимуме снимаемой мощности топливного элемента. Если же увеличивать нагрузку плавно, то не будет наблюдаться резкого падения напряжения из-за обратной связи между увеличением нагрузки и замедлением химической реакции.

Для сглаживания кривой нагрузки и плавного регулирования нагрузки на топливный элемент можно использовать массив аккумуляторных батарей. Для этого была собрана система FC-#2 с топливным элементом номинальной мощностью  $200\text{ Вт}$  и аккумуляторными батареями (см. рис. 1). Две батареи номинальным напряжением по  $12\text{ В}$  были подключены последовательно. Результаты испытаний представлены на рис. 4 и 5. Вначале блок батарей был раз-

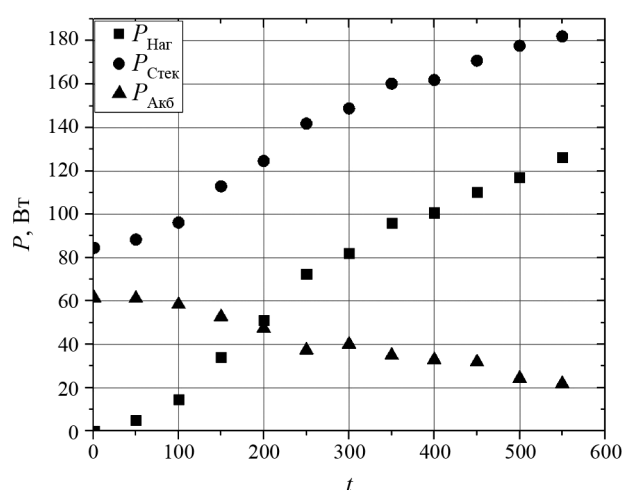


Рис. 5. График распределения мощности системы в ходе эксперимента;  $t$  – условный ход эксперимента,  $P_{\text{Наг}}$  – мощность, отбираемая нагрузкой, Вт;  $P_{\text{Стек}}$  – мощность, вырабатываемая топливным элементом, Вт;  $P_{\text{Акб}}$  – мощность, забираемая аккумуляторной системой, Вт

ражен до 19.2 В, и топливный элемент при включении стал их сразу же заряжать. При этом постепенно вырастала мощность, выдаваемая на электронную нагрузку. Таким образом, суммарно у топливного элемента было два потребителя. Как видно из рис. 4, поляризационные кривые  $U(I)$  и  $U_s(I_s)$  имеют различные значения и их пересечение начинается при токах, равных лишь 5.5 А. Таким образом, можно заключить, что в системе, состоящей из топливного элемента + нагрузка + аккумуляторные батареи, аккумуляторные батареи служат своего рода буфером, который не дает резко просесть напряжению топливного элемента. А значит, что и резкие негативные просадки напряжений на отдельных мембранно-электродных блоках минимизируются, что не приводит к снижению срока службы как всего топливного элемента, так и его составляющих. С ростом тока на нагрузке увеличивается ток, идущий с топливного элемента, а ток, идущий на заряд аккумуляторов, падает. То же самое происходит и с мощностью. Следует уточнить, что расхождение между мощностью стека и мощностью двух потребителей можно объяснить тем, что автоматика процессов регулирования работы брала часть электричества на собственные нужды.

Аккумуляторные батареи часть нагрузки могут забирать на себя, позволяя топливному элементу не откликаться на набросы мощности и не просаживаться по напряжению. Такая гибридная система более устойчива к возможному изменению внешних факторов. При постоянном требуемом значении питания топливный элемент может включаться лишь для подзарядки аккумуляторных батарей до требуемого напряжения.

### Заключение

В работе изучены особенности старта энергоустановок на твердополимерных топливных элементах в условиях низких температур окружающей среды. Вода, необходимая для обеспечения протонного транспорта мембраны, при отрицательных температурах негативно влияет на целостность топливного элемента и его запуск, так как лед блокирует транспорт реагентов/продуктов реакции.

Резкая нагрузка при отрицательных температурах негативно влияет на запуск стека и его поляризационную характеристику и может вывести его из строя, причем повреждения, случающиеся

в микромасштабном диапазоне слоев мембранно-электродных блоков, могут проявиться позже при эксплуатации, постепенно снижая поляризационную характеристику в сторону концентрационного перенапряжения. Выполнены экспериментальные исследования по изучению работы топливного элемента при холодном старте. Подтверждение повышения стабильности работы были показаны в первом эксперименте: топливный элемент FC-#1 с параметрами  $U_2, I_2, P_2$  не вышел на номинальную мощность, в то время как с параметрами  $U_3, I_3, P_3$  с предложенным методом нагрева показал номинальные характеристики и безопасность работы при минусовой температуре окружающей среды.

Показано, что для обеспечения плавного и безопасного увеличения мощности предпочтительно использование гибридной энергоустановки, состоящей из топливного элемента и аккумуляторных батарей. Аккумуляторы обрабатывают перепады мощности и сглаживают пики потребления. Низковольтных аккумуляторных батарей напряжением 19.2 В оказалось достаточно, чтобы обеспечить плавный запуск топливного элемента. После старта топливный элемент в свою очередь начинает заряжать аккумуляторные батареи и обеспечивать подачу электричества модельному потребителю – электронной нагрузке. Эксперименты подтвердили устойчивую работу созданной гибридной энергоустановки на топливных элементах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lü X., Qu Y., Wang Y., Qin C., Liu G. A comprehensive review on hybrid power system for PEMFC-HEV: Issues and strategies // *Energy Conversion and Management*. 2018. V. 171. P. 1273–1291. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.06.065
2. Contestabile M. Analysis of the market for diesel PEM fuel cell auxiliary power units onboard long-haul trucks and of its implications for the large-scale adoption of PEM FCs // *Energy Policy*. 2010. V. 38. N 10. P. 5320–5334. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.03.044
3. Narimani M., DeVaal J., Golnaraghi F. Hydrogen emission characterization for proton exchange membrane fuel cell during oxygen starvation. Part 2: Effect of hydrogen transfer leak // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. V. 41. N 41. P. 18641–18653. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.227>
4. Chrenko D., Couliq J. Static and dynamic modeling of a diesel fed fuel cell power supply // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. V. 34. N 3. P. 1377–1389. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.095>
5. Guan T., Alvfors P. An overview of biomass-fuelled proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) systems // *Energy Procedia*. 2015. V. 75. P. 2003–2008. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.257>

6. **Erbach S., Pribyl B., Klages M., Spithoff L., Borah K., Epple S., Gubler L., Pătru A., Heinen M., Schmidt T.J.** Influence of operating conditions on permeation of CO<sub>2</sub> through the membrane in an automotive PEMFC system // International Journal of Hydrogen Energy. 2018. P. 1–12. DOI:10.1016/j.ijhydene.2018.10.033
7. **Antonio S.J., Alfredo I., Felipe R., Elvira T.** Validation of cell voltage and water content in a PEM (polymer electrolyte membrane) fuel cell model using neutron imaging for different operation conditions // Energy. 2016. V. 101. P. 100–112. DOI: 10.1016/j.energy.2016.02.006
8. **Fan L., Zhang G., Jiao K.** Characteristics of PEMFC operating at high current density with low external humidification // Energy Conversion and Management. 2017. V. 150. P. 763–774. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.08.034
9. **Sanchez D.G., Garcia-Ybarra P.L.** PEMFC operation failure under severe dehydration // International Journal of Hydrogen Energy. 2012. V. 37. N 8. P. 7279–7288. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.11.059>
10. **Ferrara A., Polverino P., Pianese C.** Analytical calculation of electrolyte water content of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell for on-board modelling applications // Journal of Power Sources. 2018. V. 390. P. 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.04.005>
11. **Zhan Z., Yuan C., Hu Z., Wang H., Sui P.C., Djilali N., Pan M.** Experimental study on different preheating methods for the cold-start of PEMFC stacks // Energy. 2018. V. 162. P. 1029–1040. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.003>
12. **Luo Y., Jiao K.** Cold start of proton exchange membrane fuel cell // Progress in Energy and Combustion Science. 2018. V. 64. P. 29–61. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2017.10.003>
13. **Jiao K., Alaefour I.E., Karimi G., Li X.** Cold start characteristics of proton exchange membrane fuel cells // International Journal of Hydrogen Energy. 2011. V. 36. N 18. P. 11832–11845. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.05.101
14. **Lin R., Weng Y., Li Y., Lin X., Xu S., Ma J.** Internal behavior of segmented fuel cell during cold start // International Journal of Hydrogen Energy. 2014. V. 39. N 28. P. 16025–16035. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.12.083>
15. **Lin R., Weng Y., Lin X., Xiong F.** Rapid cold start of proton exchange membrane fuel cells by the printed circuit board technology // International Journal of Hydrogen Energy. 2014. V. 39. N 32. P. 18369–18378. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.09.065>
16. **Lin R., Ren Y.S., Lin X.W., Jiang Z.H., Yang Z., Chang Y.T.** Investigation of the internal behavior in segmented PEMFCs of different flow fields during cold start process // Energy. 2017. V. 123. P. 367–377. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.138>
17. **Amamou A., Kandidayeni M., Boulon L., Kelouwani S.** Real time adaptive efficient cold start strategy for proton exchange membrane fuel cells // Applied Energy. 2018. V. 216. P. 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.071>
18. **Oszcipok M., Zedda M., Riemann D., Geckeler D.** Low temperature operation and influence parameters on the cold start ability of portable PEMFC // Journal of Power Sources. 2006. V. 154. N 2. P. 404–411. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.10.035>
19. **Tang Y., Yuan W., Pan M., Wan Z.** Experimental investigation on the dynamic performance of a hybrid PEM fuel cell/battery system for lightweight electric vehicle application // Applied Energy. 2011. V. 88. N 1. P. 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.033>
20. **Ou K., Yuan W.-W., Choi M., Yang S., Jung S., Kim Y.-B.** Optimized power management based on adaptive-PVM algorithm for a stationary PEM fuel cell/battery hybrid system // International Journal of Hydrogen Energy. 2018. V. 43. N 32. P. 15433–15444. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.06.072
21. **Roda V., Carroquino J., Valiño L., Lozano A., Barreras F.** Remodeling of a commercial plug-in battery electric vehicle to a hybrid configuration with a PEM fuel cell // International Journal of Hydrogen Energy. 2018. V. 43. N 35. P. 16959–16970. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.171>
22. **Zhan Y., Wang H., Zhu J.** Modelling and control of hybrid UPS system with backup PEM fuel cell/battery // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2012. V. 43. N 1. P. 1322–1331. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.03.046>
23. **Zhang Y., Zhou B.** Modeling and control of a portable proton exchange membrane fuel cell-battery power system // Journal of Power Sources. 2011. V. 196. N 20. P. 8413–8423. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.05.022>

## Improving the stability and long-term operation of PEMFCs

**K.V. Agapov<sup>1,2</sup>, D.O. Dunikov<sup>2,3</sup>, M.A. Klimova<sup>2</sup>, K.D. Kuzmin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*InEnergy LLC, Moscow, 115201, Russia*

<sup>2</sup>*National Research University, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 115250, Russia*

<sup>3</sup>*Joint Institute for High Temperature RAS, Moscow, 125412, Russia*

*e-mail: agapovkv@mail.ru; ddo@mail.ru; klimovam\_a@mail.ru; k.kuzmin@inenergy.ru*

An experimental system was created and experiments were performed to study the performance of a fuel cell with polymer electrolyte with a nominal power of 40 W at a cold start. It was found that the rapid output to the rated power at a negative air temperature adversely affects to the stack. The water inside solidifies and blocks the transport of gases, and the conductivity of a membrane falls. Therefore, at the start of the fuel cell, it is first necessary to warm up the entire stack to a positive temperature and melt the water contained inside. This paper proposes the next way to solve this problem: thermoelectric heater was installed inside the system. This allowed maintaining a positive temperature of the output line and removing part of the water vapor during the purge together with unreacted hydrogen. In addition, due to heat dissipation, the air coming from the environment is slightly heated before entering to the cathode. In cold starts, it is important to ensure the smoothness of the load increase. In our work, the initial value of the current was 0.05 A, but it is possible to start with the values above. As a result, it becomes possible successfully perform a cold start of a solid polymer fuel cell, while the internal

components of the stack will not be damaged due to a violation of the start mode. To ensure a smooth and safe increase in power, it is preferable to use a hybrid power plant consisting of a fuel cell and batteries. Batteries work power fluctuations and smooth the peaks of consumption. Low-voltage batteries with a voltage of 19.2 V were enough to ensure a smooth start of the fuel cell. After the start, the fuel cell, in turn, begins to charge the batteries and provide electricity to the model consumer – electronic load. The experiments confirmed the stable operation of the created hybrid power plant based on fuel cells.

**Keywords:** hydrogen, proton-exchange membrane fuel cell, cold start, improve the stability of PEMFC.

## REFERENCES

1. Lü X., Qu Y., Wang Y., Qin C., Liu G. A comprehensive review on hybrid power system for PEMFC-HEV: Issues and strategies. *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 171, pp. 1273–1291. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.06.065
2. Contestabile M. Analysis of the market for diesel PEM fuel cell auxiliary power units onboard long-haul trucks and of its implications for the large-scale adoption of PEM FCs. *Energy Policy*, 2010, vol. 38, no. 10, pp. 5320–5334. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.03.044
3. Narimani M., De Vaal J., Golnaraghi F. Hydrogen emission characterization for proton exchange membrane fuel cell during oxygen starvation. Part 2: Effect of hydrogen transfer leak. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, vol. 41, no. 41, pp. 18641–18653. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.227>
4. Chrenko D., Coulić J. Static and dynamic modeling of a diesel fed fuel cell power supply. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, vol. 34, no. 3, pp. 1377–1389. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.095>
5. Guan T., Alvfors P. An overview of biomass-fuelled proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) systems. *Energy Procedia*, 2015, vol. 75, pp. 2003–2008. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.257>
6. Erbach S., Pribyl B., Klages M., Spithoff L., Borah K., Epple S., Gubler L., Pătru A., Heinen M., Schmidt T.J. Influence of operating conditions on permeation of CO<sub>2</sub> through the membrane in an automotive PEMFC system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, DOI:10.1016/j.ijhydene.2018.10.033
7. Antonio S.J., Alfredo I., Felipe R., Elvira T. Validation of cell voltage and water content in a PEM (polymer electrolyte membrane) fuel cell model using neutron imaging for different operation conditions. *Energy*, 2016, vol. 101, pp. 100–112. DOI: 10.1016/j.energy.2016.02.006
8. Fan L., Zhang G., Jiao K. Characteristics of PEMFC operating at high current density with low external humidification. *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 150, pp. 763–774. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.08.034
9. Sanchez D.G., Garcia-Ybarra P.L. PEMFC operation failure under severe dehydration. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, vol. 37, no. 8, pp. 7279–7288. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.11.059>
10. Ferrara A., Polverino P., Pianese C. Analytical calculation of electrolyte water content of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell for on-board modelling applications. *Journal of Power Sources*, 2018, vol. 390, pp. 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.04.005>
11. Zhan Z., Yuan C., Hu Z., Wang H., Sui P.C., Djilali N., Pan M. Experimental study on different preheating methods for the cold-start of PEMFC stacks. *Energy*, 2018, vol. 162, pp. 1029–1040. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.003>
12. Luo Y., Jiao K. Cold start of proton exchange membrane fuel cell. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, vol. 64, pp. 29–61. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.10.003>
13. Jiao K., Alaefour I.E., Karimi G., Li X. Cold start characteristics of proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, vol. 36, no. 18, pp. 11832–11845. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.05.101
14. Lin R., Weng Y., Li Y., Lin X., Xu S., Ma J. Internal behavior of segmented fuel cell during cold start. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, vol. 39, no. 28, pp. 16025–16035. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.12.083>
15. Lin R., Weng Y., Lin X., Xiong F. Rapid cold start of proton exchange membrane fuel cells by the printed circuit board technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, vol. 39, no. 32, pp. 18369–18378. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.09.065>
16. Lin R., Ren Y.S., Lin X.W., Jiang Z.H., Yang Z., Chang Y.T. Investigation of the internal behavior in segmented PEMFCs of different flow fields during cold start process. *Energy*, 2017, vol. 123, pp. 367–377. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.138>
17. Amamou A., Kandidayeni M., Boulon L., Kelouani S. Real time adaptive efficient cold start strategy for proton exchange membrane fuel cells. *Applied Energy*, 2018, vol. 216, pp. 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.071>
18. Oszipok M., Zedda M., Riemann D., Geckeler D. Low temperature operation and influence parameters on the cold start ability of portable PEMFC. *Journal of Power Sources*, 2006, vol. 154, no. 2, pp. 404–411. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.10.035>
19. Tang Y., Yuan W., Pan M., Wan Z. Experimental investigation on the dynamic performance of a hybrid PEM fuel cell/battery system for lightweight electric vehicle application. *Applied Energy*, 2011, vol. 88, no. 1, pp. 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.033>
20. Ou K., Yuan W.-W., Choi M., Yang S., Jung S., Kim Y.-B. Optimized power management based on adaptive-PVM algorithm for a stationary PEM fuel cell/battery hybrid system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, vol. 43, no. 32, pp. 15433–15444. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.06.072
21. Roda V., Carroquino J., Valiño L., Lozano A., Barreras F. Remodeling of a commercial plug-in battery electric vehicle to a hybrid configuration with a PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, vol. 43, no. 35, pp. 16959–16970. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.171>
22. Zhan Y., Wang H., Zhu J. Modelling and control of hybrid UPS system with backup PEM fuel cell/battery. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2012, vol. 43, no. 1, pp. 1322–1331. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.03.046>
23. Zhang Y., Zhou B. Modeling and control of a portable proton exchange membrane fuel cell-battery power system. *Journal of Power Sources*, 2011, vol. 196, no. 20, pp. 8413–8423. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.05.022>