

УДК 62-71

Обзор существующих и перспективных методов охлаждения и термостабилизации электрохимического генератора на основе водородных топливных элементов с протонообменной мембраной

Жаров Антон Андреевич	zharov_a@inbox.ru
Шульга Егор Константинович	e.shulga@h2ru.pro
Равдин Николай Алексеевич	n.ravdin@h2ru.pro
Рыбалов Олег Дмитриевич	o.rybalov@h2ru.pro

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Представлен обзор существующих и перспективных методов охлаждения и термостабилизации электрохимического генератора (ЭХГ) на основе топливных элементов с протонообменной мембраной (ПОМТЭ). ПОМТЭ во время работы выделяют определенное количество тепла, что является побочным продуктом протекающей электрохимической реакции, а также потерями, возникающими из-за сопротивления батареи топливных элементов (БТЭ) электрическому току. Для достижения максимального КПД температура реакции в топливном элементе (ТЭ) должна поддерживаться с достаточной точностью в определенном температурном диапазоне. В то же время, топливный элемент не может самопроизвольно поддерживать необходимую температуру равномерной в зоне реакции, повышение температуры ТЭ приведет к снижению производительности и ускоренной деградации. Таким образом, необходима система охлаждения и термостабилизации. Большая вариативность мощностей, конструкций и областей эксплуатации ПОМТЭ требуют подходящих технических решений, в настоящее время активно применяется воздушные и жидкостные системы. В данной статье также рассмотрены перспективные системы охлаждения и термостабилизации.

Ключевые слова: топливный элемент с протонообменной мембраной, система охлаждения, топливный элемент, водород, испарительное охлаждение

A review of existing and promising methods of cooling and thermal stabilization of an electrochemical generator based on hydrogen fuel cells with a proton exchange membrane

Zharov Anton Andreevich	zharov_a@inbox.ru
Shulga Egor Konstantinovich	e.shulga@h2ru.pro
Ravdin Nikolai Alekseevich	n.ravdin@h2ru.pro
Rybalov Oleg Dmitrievich	o.rybalov@h2ru.pro

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. This article presents an overview of existing and promising methods for cooling and thermal stabilization of electrochemical generators (ECGs) based on proton-exchange mem-

brane fuel cells (PEMFCs). PEMFCs generate a certain amount of heat during operation, which is a byproduct of the electrochemical reaction and losses arising from the resistance of the fuel cell stack (FCS) to electric current. To achieve maximum efficiency, the reaction temperature in the fuel cell (FC) must be maintained with sufficient accuracy within a specific temperature range. However, the fuel cell cannot spontaneously maintain the required temperature uniformly in the reaction zone; increasing the FC temperature will lead to reduced performance and accelerated degradation. Therefore, a cooling and thermal stabilization system is necessary. The wide variability of PEMFC capacities, designs, and operational areas requires suitable technical solutions; air and liquid systems are currently widely used. This article also discusses promising cooling and thermal stabilization systems.

Keywords: *proton exchange membrane fuel cell, cooling system, fuel cell, hydrogen, evaporative cooling*

Введение. В настоящее время ключевой проблемой в области энергетики является постоянный рост потребления энергоресурсов, особенно ярко выражена необходимость в экологически чистой, но в то же время экономически обоснованной энергии. Такая потребность связана с проблемой экологии крупных городов, где большая концентрация потребителей и преобразователей энергии приводит к локальным загрязнениям воздуха, превышающих ПДК и превышениям уровня шума. Поэтому в области развития энергетики существуют задачи, направленные на разработку и применение высокоэффективных альтернативных источников энергии. Особый интерес представляют экологически безопасные и эффективно генерирующие электрическую энергию устройства мощностью до 200 кВт. В качестве таких устройств рассматривают топливные элементы с протонообменной мембраной (ПОМТЭ). Именно ПОМТЭ обладают наиболее универсальными характеристиками, позволяющими применять их практически во всех областях энергетики. К преимуществам ПОМТЭ можно отнести низкую рабочую температуру (50–90 °C), быстрый выход на номинальный режим, небольшие габариты, возможность работы при отрицательных температурах без потери своих свойств и полное отсутствие вредных выбросов. Ключевым преимуществом ПОМТЭ является высокий коэффициент полезного действия (КПД) (50–80 %), который выше КПД двигателей внутреннего сгорания (~40 %). Топливом для ПОМТЭ является водород, обладающий наибольшим значением удельной теплоты сгорания. Стоит отметить, что водород является возобновляемым энергоносителем. Так, вода, полученная в результате работы ПОМТЭ при помощи электролиза, может быть снова преобразована в водород.

Важным преимуществом применения ПОМТЭ в энергоустановках является масштабируемость мощности в широком диапазоне без изменения технологии и процесса производства основных компонентов. Актуальность этой работы связана с принятием программы развития водородной энергетики в России до 2030 г. А также с тем, что это представляет особый интерес для импортозамещения аналогов.

Целью работы является обзор существующих и перспективных методов охлаждения и термостабилизации электрохимического генератора на основе

водородных топливных элементов с протонообменной мембраной, обзор технологий, применяемых в ЭХГ и особенностей их применения на транспорте.

Материалы и методы. Как и другие преобразующие энергию устройства, топливные элементы с протонообменной мембраной (ПОМТЭ) наряду с генерацией электроэнергии выделяют тепло, однако природа тепловыделения в них имеет существенные отличия от традиционных устройств. Поляризационная кривая служит ключевым инструментом для:

- анализа рабочих параметров и эффективности ПОМТЭ;
- сравнительного анализа различных (ПОМТЭ).

Количественную оценку тепловыделения в батарее ПОМТЭ можно получить путем сравнения реального рабочего напряжения при нагрузке с теоретическим значением. Однако поляризационная кривая не содержит информации о пространственном распределении температуры и локальных тепловых потоках, что играет важную роль при проектировании батарей ТЭ.

Существуют различные способы охлаждения батарей топливных элементов с протонообменной мембраной, выбор способа охлаждения зависит от размера и области применения батарей (рис. 1):

- маломощные батареи (до 100 Вт) — охлаждение потоком реакционного воздуха;
- батареи средней мощности (200 Вт — 5 кВт) — охлаждение потоком реакционного воздуха либо через отдельные воздушные каналы;
- высокомощные батареи (свыше 10 кВт) — применяется жидкостное охлаждение.

Тип системы охлаждения для ПОМТЭ



Рис. 1. Типы систем охлаждения

В современных исследованиях рассматриваются перспективные методы охлаждения и термостатирования БТЭ [1, 2]:

- интеграция тепловых трубок в конструкцию топливных элементов;
- встраивание микротепловых трубок в межконтактные области биполярных пластин;

– оптимизация жидкостного охлаждения: необходима организация отдельных охлаждающих каналов.

На рис. 2 схематично представлены различные методы охлаждения, обычно применяемые для РЕМ-топливных элементов.

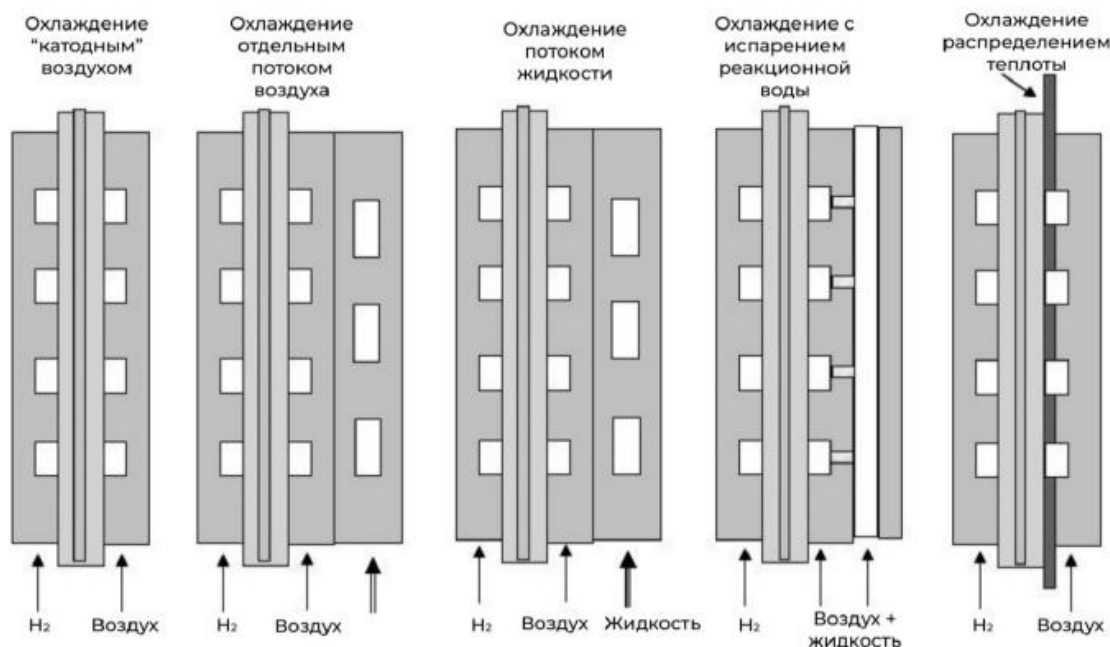


Рис. 2. Методы охлаждения ПОМТЭ

Охлаждение потоком катодного воздуха. Для маломощных батарей (до нескольких сотен ватт) может применяться охлаждение исключительно за счет катодного воздушного потока. В таких батареях площадь внешней поверхности обычно значительно превышает активную площадь (например, в РЕМ-элементах с воздушным дыханием), что обеспечивает достаточный теплоотвод. Однако данный метод требует увеличенных размеров каналов на катодной стороне по сравнению с анодной, что приводит к росту габаритов системы.

Охлаждение отдельным воздушным потоком. Для батарей мощностью свыше нескольких сотен ватт необходима организация отдельных охлаждающих каналов, через которые продувается воздух для отвода тепла, выделяющегося в результате экзотермических реакций в топливном элементе [2, 3].

Жидкостное охлаждение. Благодаря более высоким теплофизическим характеристикам (удельной теплоемкости, теплопроводности) жидкостей по сравнению с газами, данный метод является предпочтительным для высокомощных батарей, в частности в автомобильных применениях. Охлаждение осуществляется через специальные каналы с жидким теплоносителем.

Испарительное охлаждение (с фазовым переходом). Метод основан на использовании энтальпии испарения воды, которая впрыскивается в реакционные потоки [6]. Тепло, генерируемое на электродах, поглощается при фазовом переходе воды, обеспечивая изотермические условия. Дополнительно

ным преимуществом является предотвращение высыхания мембраны. Исследования показывают, что при высокой нагрузке требуется увеличенный расход воды для поддержания насыщенных условий на выходе и обеспечения достаточного охлаждения (рис. 2).

Охлаждение с использованием теплопроводящих элементов. Теплоотводящие элементы из высокопроводящих материалов (например, пиролитического графита) монтируются рядом с пластинами потоковых каналов (рис. 2). Тепло сначала передается путем теплопроводности, затем рассеивается в окружающую среду за счет естественной или принудительной конвекции. Применение таких элементов позволяет уменьшить габариты системы охлаждения в мощных батареях. Экспериментально подтверждено, что использование графитовых пластин на катодной стороне может увеличить максимальную мощность 10-элементной батареи на 15 % [4, 5].

Жидкостное охлаждение. Жидкостное охлаждение широко применяется в мощных ЭХГ на основе ПОМТЭ в автомобильном транспорте, где пространство и вес являются ограничивающими факторами. На рис. 3 представлена типовая конфигурация автомобильной топливно-элементной системы. Видно, что тепло должно отводиться из транспортного средства в окружающую среду через ТОА с воздушным охлаждением — радиатор. Размеры радиаторов, используемых в автомобилях с ЭХГ, в настоящее время очень велики из-за малой разницы температур между потоком охлаждающей жидкости (ОЖ) и окружающим воздухом. Размер радиаторов является важным ограничивающим фактором. Рабочую температуру ПОМТЭ батареи даже приходится повышать до 90–95 °С в критических режимах движения, чтобы обеспечить отвод тепла, что подтвердили полевые испытания водородного автомобиля с ЭХГ Volkswagen [7]. Однако работа ПОМТЭ при таких высоких температурах остается проблематичной для современных мембран. Поэтому необходимы дальнейшие исследования по оптимизации всей системы охлаждения автомобильных ЭХГ.

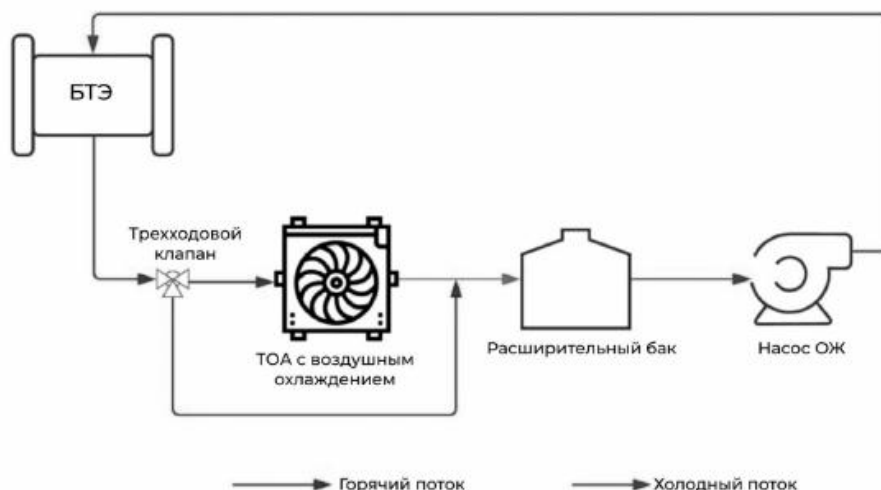


Рис. 3. Типовая жидкостная система охлаждения БТЭ

Для повышения эффективности охлаждения в условиях высокого тепловыделения при фиксированной мощности радиатора возможно использование ПКХМ в качестве дополнительной системы охлаждения БТЭ. На рис. 4 схематично показана компоновка системы охлаждения с ПКХМ с использованием CO_2 в качестве хладагента.

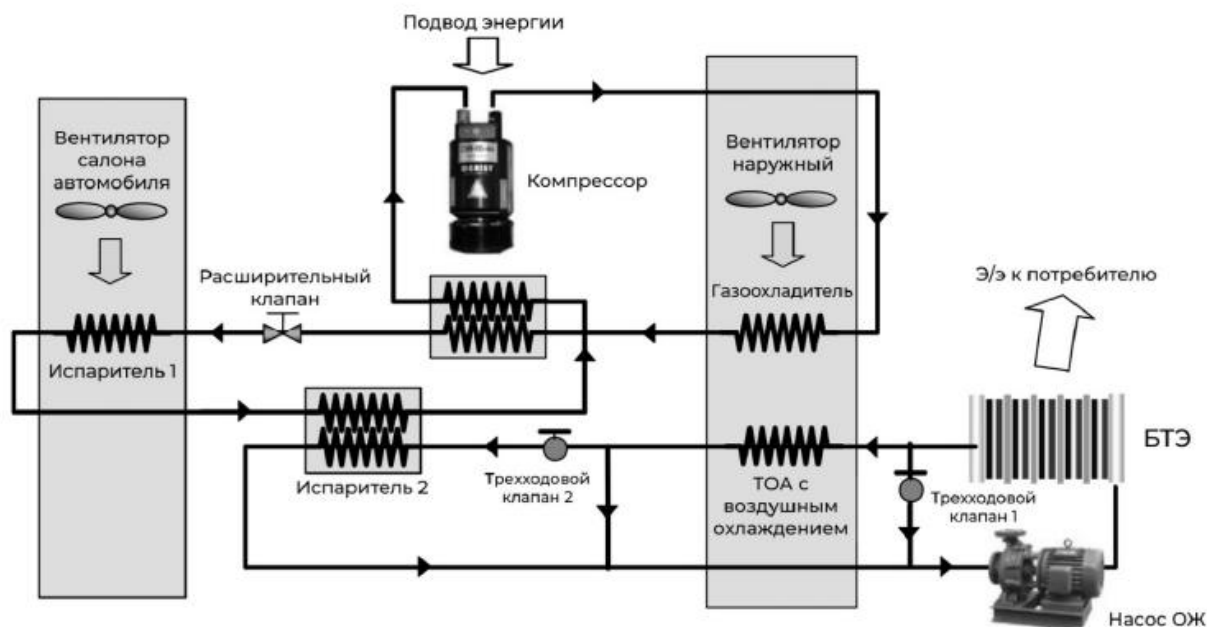


Рис. 4. Схема охлаждения БТЭ с ПКХМ на CO_2

В номинальном режиме работы трехходовой клапан 2 закрыт, ПКХМ обеспечивает охлаждение салона. При повышенной потребности в охлаждении БТЭ клапан 2 открывается, а внутренний вентилятор охлаждения салона отключается, что позволяет использовать ПКХМ для охлаждения стека вместо салона. Сообщается, что количество отведенного от БТЭ тепла может быть увеличено на 36 % с помощью подобной системы с ПКХМ. В более позднем исследовании изучалась работа ПКХМ с хладагентом CO_2 для охлаждения БТЭ в различных условиях, а также взаимосвязь между охлаждением салона и стека.

На рис. 4 представлена схема системы охлаждения батареи с применением ПКХМ, которая включает в себя следующие компоненты:

- компрессор;
- газовый охладитель;
- внутренний теплообменник;
- расширительный клапан;
- испаритель;
- охладитель батареи.

Теплоотводящий контур батареи состоит из:

- батареи топливных элементов;
- радиатора;

- насоса;
- перепускных клапанов;
- охладителя батареи.

Оба контура взаимодействуют через охладитель батареи, осуществляя теплообмен. Газовый охладитель и радиатор расположены по направлению потока наружного воздуха, что позволяет системе кондиционирования непосредственно влиять на теплоотвод через радиатор (рис. 4).

Результаты. Анализ показал, что выбор системы охлаждения для ЭХГ на основе ПОМТЭ напрямую зависит от мощности установки. Для маломощных систем (до 100 Вт) эффективно пассивное воздушное охлаждение. Для средних мощностей (до 5 кВт) требуется организация отдельного воздушного потока. Однако для высокомоощных применений, особенно в транспорте, необходимо жидкостное охлаждение из-за высокой плотности тепловых потоков.

Основная проблема жидкостных систем — большие габариты радиатора, обусловленные малой разницей температур между охлаждающей жидкостью (~80 °С) и окружающим воздухом. Это вынуждает работать на границе допустимых температур (90–95 °С), что ускоряет деградацию мембраны.

Перспективным направлением является гибридизация систем. Комбинация жидкостного контура с парокомпрессионной холодильной машиной (ПКХМ), например на CO₂, позволяет на 36 % увеличить теплосъем в пиковых режимах. Испарительное охлаждение также эффективно за счет использования скрытой теплоты парообразования, одновременно решая задачу увлажнения мембраны. Таким образом, не существует универсального решения, и дальнейшее развитие связано с созданием адаптивных комбинированных систем.

Заключение. В работе проведен обзор методов охлаждения электрохимических генераторов на основе ПОМТЭ. Поддержание строгого температурного режима критически важно для их эффективности и долговечности. Ключевой вывод заключается в том, что применяемая технология охлаждения определяется мощностью БТЭ: воздушное — для малых мощностей, жидкостное — для высоких. Наиболее актуальными задачами для современных систем, особенно в транспорте, являются:

- уменьшение габаритов теплообменников;
- повышение эффективности теплоотвода в экстремальных условиях.

Наибольший потенциал для решения этих задач имеют перспективные методы:

- гибридные системы (жидкостной контур + ПКХМ);
- испарительное охлаждение;
- использование теплопроводящих материалов (графит).

Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию и интеграцию этих методов для создания компактных, надежных и адаптивных систем термостабилизации, что является ключевым фактором для широкого внедрения водородных технологий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Li Q., Liu Z., Sun Y., Yang S., Deng Ch. A review on temperature control of proton exchange membrane fuel cells. *Processes*, 2021, vol. 9, no. 235, pp. 3–21.
<https://doi.org/10.3390/pr9020235>
- [2] Novotný J., Nováková L., Čížek R., Kašpárek M. Optimization of air mass flow in a PEM fuel cell. *EPJ Web of Conferences*, 2022, vol. 264, art. no. 01026, pp. 2–5.
<https://doi.org/10.1051/epjconf/202226401026>
- [3] Yan Q., Toghiani H., Causey H. Steady state and dynamic performance of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) under various operating conditions and load changes. *J. Power Source*, 2006, vol. 161, pp. 492–502.
- [4] Cruz Rojas A., Lopez G., Gomez-Aguilar J.F., Alvarado V.M., Sandoval Torres C.L. Control of the Air Supply Subsystem in a PEMFC with Balance of Plant Simulation. *Sustainability*, 2017, vol. 9, art. no. 73.
- [5] Chen J., Liu Z., Wang F., Ouyang Q., Su H. Optimal Oxygen Excess Ratio Control for PEM Fuel Cells. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 2018, vol. 26, pp. 1711–1721.
- [6] Zawodzinski T., Gottesfeld S., McCarthy T.J. The contact angle between water and the surface of perfluorosulphonic acid membranes. *Journal of Applied Electrochemistry*, 1993, vol. 23, pp. 86–88.
- [7] IFP School. *Hydrogen for Mobility*. URL: <https://mooc.innovation.ifp-school.com/Training/view/227190> (accessed 22.07.2025).