

Анализ испарительного и жидкостного методов охлаждения блоков топливных элементов методом относительных энергетических показателей*

Карелин Д.Л., Болдырев А.В., Болдырев С.В., Колбина Т.Ю.

Набережночелнинский институт (филиал)

ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

г. Набережные Челны, Российская Федерация

alexeyboldyrev@mail.ru

Аннотация. В работе проведено численное исследование процесса теплоотдачи в топливном элементе с протонообменной мембраной при использовании жидкостной и испарительной систем охлаждения. Результат показывает, что испарительная система охлаждения позволяет поддерживать меньший перепад температур на биполярной пластине, следовательно, обеспечивает большую стабильность параметров работы топливного элемента и увеличивает его эффективность.

Ключевые слова: топливный элемент, жидкостное охлаждение, воздушное охлаждение, биполярная пластина

ВВЕДЕНИЕ

Водородные топливные элементы (ТЭ) являются альтернативным источником энергии для транспортных средств с электрической энергоустановкой, которые, в свою очередь, считаются альтернативой двигателю внутреннего сгорания. По сравнению с ДВС такая установка обладает рядом преимуществ, а именно: отсутствие вредных выбросов выхлопных газов, более высокий КПД, а также возможность использования водорода в качестве возобновляемого источника энергии.

Перед широким распространением транспортных средств на водородных топливных элементах необходимо решить множество проблем, одна из которых заключается в том, как эффективно термостатировать топливный элемент с РЕМ и отводить избыточное тепло. Низкий тепловой поток выхлопных газов топливных элементов с протонообменной мембраной (РЕМ) по сравнению с двигателями внутреннего сгорания приводит к уменьшению теплового потока, отводимого через радиатор несмотря на то, что количество тепла, выделяемого топливным элементом в систему охлаждения, выше [1]. Это обстоятельство при более низких рабочих температурах приводит к дополнительным сложностям работы системы охлаждения ТЭ.

Авторы в более ранних исследованиях, в которых сравнивались требования к теплообменникам двигателей внутреннего сгорания и силовых агрегатов на топливных элементах, пришли к выводу, что для транспортных средств на топливных элементах необходима фронтальная площадь радиатора в два-четыре раза превышающая размер радиаторов обычных ДВС равной мощности, и до четырех раз превышающий поток охлаждающего воздуха [1-3].

АНАЛИЗ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЭ.

ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ.

Как правило системы охлаждения топливных элементов можно разделить на три категории: жидкостное охлаждение, воздушное охлаждение и охлаждение за счет фазового перехода [4].

Жидкостное охлаждение.

Конвективная передача тепла к жидкому теплоносителю является наиболее распространенным методом отвода отработанного тепла от батарей топливных элементов (РЕМ) более высокой мощности [5]. Отработанное тепло передается из ячейки через биполярную пластину к теплоносителю, который течет по отдельным охлаждающим каналам. После чего нагретый хладагент движется через отдельный теплообменник, где тепло выбрасывается в окружающую среду, либо используется для альтернативных целей.

Воздушное охлаждение.

Протекание окружающего воздуха либо через катод, либо через дополнительные охлаждающие пластины между элементами является наиболее простым методом отвода отходящего тепла от топливных элементов, так как в установке требуется минимальная балансировка. Авторы исследовали улучшение теплопередачи за счет использования металлической пены, показав улучшенную производительность за счет высоких потерь в насосах [6,7,11].

Охлаждение с фазовым переходом.

Охлаждение с фазовым переходом использует энтропию парообразования для отвода отработанного тепла из топливного элемента и может быть реализовано как: тепловые трубки, проточное кипение и испарительное охлаждение. Не смотря на то что, было показано, что тепловые трубки эффективны для пассивного отвода тепла от небольших батарей топливных элементов [8], требуемые площади конденсаторов и короткие длины труб делают современные конструкции более подходящими для распределения тепла в маломощных топливных элементах. Кипение в потоке применительно к топливным элементам с РЕМ было экспериментально изучено в трудах [9, 10]. Обе работы представляли необратимость топливных элементов с использованием теплового аккумулятора, демонстрируя

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

потенциал для снижения нагрузки на насосе, хорошей однородности температуры и удельного отвода тепла до трех раз выше, чем при жидкостном охлаждении [9]. Кипение в потоке имеет дополнительный потенциал для улучшения охлаждения транспортных средств на топливных элементах, поскольку высокие коэффициенты теплопередачи, наблюдаемые в конденсаторе, могут помочь уменьшить требуемые площади теплообмена. Однако эту технологию еще предстоит разработать на уровне блока, масштабируемого для автомобильных силовых агрегатов.

Система жидкостного охлаждения.

Рассматриваемая в данной статье система с жидкостным охлаждением представлена на рис. 1. Отбор тепла из блока осуществляется за счет принудительной конвекции жидкой воды через круглые каналы внутри биполярных пластин. Обычный ребристый радиатор с поперечным потоком жидкости и воздуха используется для отвода отработанного тепла в окружающую среду. Температура блока регулируется обратной связью перепускного клапана радиатора, повышение температуры охлаждающей жидкости в блоке поддерживается на уровне не более 5°C с помощью насоса с регулируемым расходом.

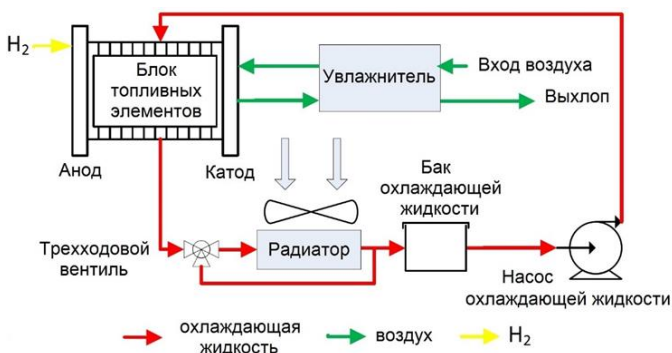


Рис. 1. Жидкостная система охлаждения ТЭ

Система с испарительным охлаждением (ЕС)

В испарительной системе охлаждения (рис. 2) тепло отводится от блока ТЭ за счет кипения R-245ca в круглых каналах внутри биполярных пластин.

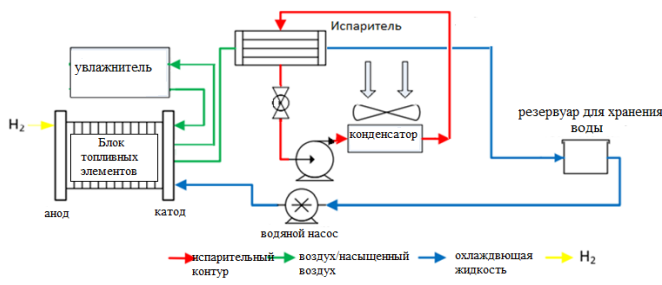


Рис. 2. Испарительная система охлаждения ТЭ

Альтернативой является использование испарителя для передачи тепла в контур охлаждения вода/гликолев. Одним из преимуществ системы с промежуточным испарителем является то, что контур охлаждающей жидкости можно комбинировать с дополнительными охлаждающими нагрузками транспортного средства.

Для сравнительной оценки характеристик испарительной и жидкостной систем охлаждения было выполнено численное моделирование тепловой нагрузки [12].

Моделирование производилось для следующих условий:

- температура наружного воздуха T'_B изменялась в пределах от плюс 10 °С до плюс 50 °С;
- набивки теплообменника-конденсатора и водо-воздушного теплообменника по конструкции принимались идентичными;
- коэффициент теплопередачи являлся функцией $k_{T0} = f(\alpha_B(G_B))$ массового расхода G_B охлаждающего воздуха при значениях его теплофизических свойств, соответствующих среднему интервалу изменения температуры (изменение теплофизических свойств воздуха в интервале изменения температуры не учитывалось);
- для функции $\alpha_B = f(G_B)$ теплообменника-конденсатора и водо-воздушного теплообменника использовалось одно критериальное уравнение;
- величина массового расхода и теплофизические свойства теплоносителя «Тосол-65» принимались постоянными.

Таким образом, уравнение математической модели [2]:

$$\begin{cases} Q_{и(i,j,k)} = k_{t_K} k_{K_i} F_K \left(x_k \frac{q_{и}}{q_K} \right) \left[(T_K - T'_{B_j}) - \frac{q_K G_{Ком}}{2G_{B_i} c_{pB}} \right] \\ G_B > 0 \\ k_{K_i} = f(\alpha_B(G_{B_i})) \\ 0 < x_k \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

где x_k – переменная, характеризующая изменение массового расхода рабочего агента $G_{Ком}$ и определяющая тепловую производительность испарительной системы охлаждения $Q_{и}$ в зависимости от затраты энергии на работу компрессора при изменении массового расхода рабочего агента в интервале от min-го значения, равного «нулю», до max-го значения, для которого производится расчет системы охлаждения.

На рис. 3-5 показана зависимость мощности теплового потока, отведенного жидкостной и испарительной системами от охлаждаемого объекта при изменении массового расхода G_B и температуры T'_B охлаждающего воздуха через теплообменник-конденсатор, а именно: на рис. 3 – зависимость мощности теплового потока Q_{CO} для жидкостной системы охлаждения при использовании водо-воздушного теплообменника; на рис. 4 – зависимость мощности теплового потока $Q_{и}$ для испарительной системы охлаждения; на рис. 5 [13] – сравнение мощностей тепловых потоков Q_{CO} жидкостной и $Q_{и}$ испарительной систем охлаждения.

При снижении температуры охлаждающего воздуха T'_B до плюс 10°C, теплоотдача для жидкостной системы охлаждения повышается до 15,3 кВт (рис. 3), при этом для испарительной системы охлаждения этот параметр возрастает до 20,8 кВт (рис. 4).

Так, при повышении температуры охлаждающего воздуха с 30°C до 50°C эффективность испарительной системы относительно жидкостной системы возрастает от 1,53 до 1,95 раза (рис. 5).

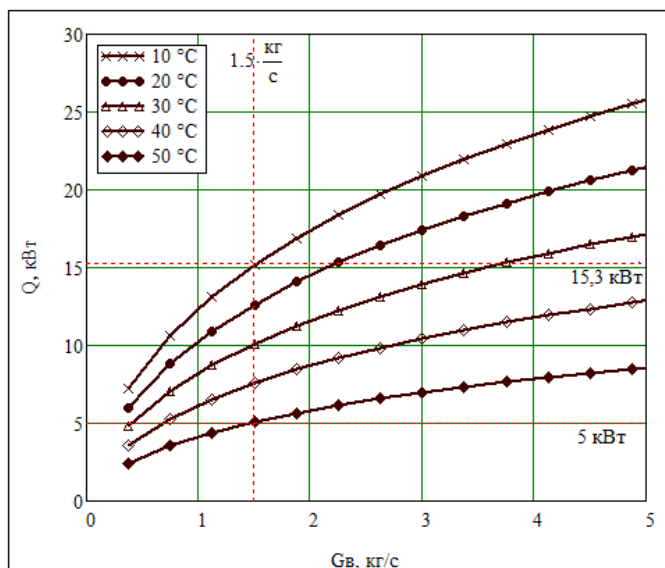


Рис. 3. Зависимость мощности теплового потока, отводимого жидкостной системой от охлаждаемого объекта, от изменения массового расхода G_B и температуры наружного воздуха T'_B

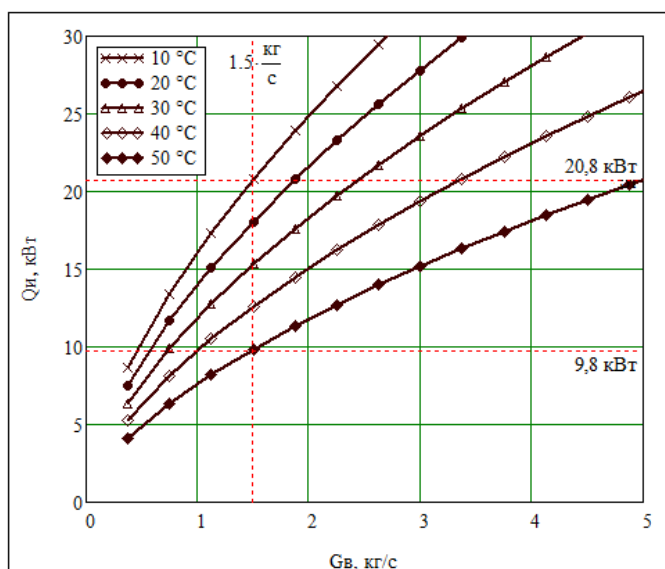


Рис. 4. Зависимость мощности теплового потока, отводимого испарительной системой от охлаждаемого объекта, от изменения массового расхода G_B и температуры наружного воздуха T'_B

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результат расчета процессов в испарительной системе охлаждения водородного ТЭ показал, что мощность, отводимая от ТЭ в случае применения испарительной системы охлаждения при одинаковых значениях температуры и массового расхода охлаждающего воздуха, а также одинаковой набивке теплообменного аппарата (с внешней окружающей средой), значительно выше мощности, отводимой «традиционной» жидкостной системой охлаждения. Так при массовом расходе 1,5 кг/с и температуре 50 °С охлаждающего воздуха тепловая мощность жидкостной систе-

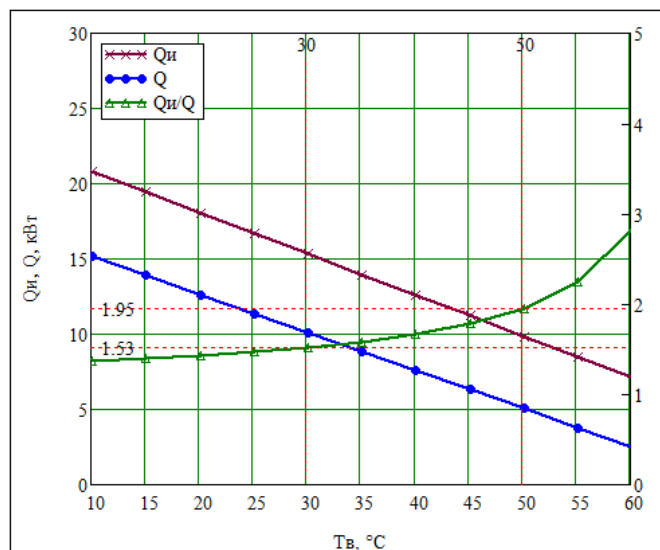


Рис. 5. Сравнение мощностей тепловых потоков Q_{co} жидкостной и Q_{li} испарительной систем охлаждения при изменении температуры T'_B и одинаковом массовом расходе G_B охлаждающего воздуха

мы охлаждения составляет около 5 кВт. При снижении температуры охлаждающего воздуха до 10 °С теплоотдача для жидкостной системы повышается до 15,3 кВт (рис. 4), при этом для испарительной системы этот параметр возрастает до 20,8 кВт. Таким образом, повышение эффективности от использования двухфазного метода охлаждения составляет 53% и 95% соответственно (рис. 5). Это хорошо согласуется с общими результатами многих литературных источников [14, 15], показывающих, что перегрев стенки при таком охлаждении существенно не меняется при колебаниях теплового потока.

Таким образом, эффективность испарительной системы охлаждения значительно выше «традиционной» жидкостной во всем диапазоне рассмотренных температур охлаждающего наружного воздуха, поэтому ее целесообразнее применять в системах, где требуется охлаждение теплоносителя до значений близких к температуре окружающей среды, например, таких как водородный топливный элемент.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fronk M.H. Pem fuel cell system solutions for transportation / M.H. Fronk, D.L. Wetter, D.A. Masten, A. Bosco // SAE Tech Pap 2000. – 2000-01-0373, 2011-32-0644.
2. Adams J.A. The development of ford's p2000 fuel cell vehicle / J.A. Adams, W. Chul Yang, K.A. Oglesby, K.D. Osborne // SAE Tech Pap 2000. – 2000-01-1061, 2011-32-0644.
3. Rogg S. Cooling modules for vehicles with a fuel cell drive / S. Rogg, M. Hoglinger, E. Zwitterig, C. Pfender, W. Kaiser, T. Heckenberger // Fuel Cells. – 2003.
4. Zhang G. A critical review of cooling techniques in proton exchange membrane fuel cell stacks / G. Zhang, S.G. Kandlikar // Int J Hydrogen Energy. – 2012.
5. Larminie J. Fuel cell systems explained. 2nd ed. / J. Larminie, A. – Dicks Wiley, 2006.
6. Odabae M. Metal foam heat exchangers for thermal management of fuel cell systems, an experimental study / M. Odabae, S. Mancin, K. Hooman // Exp Therm Fluid Sci. – 2013.

7. Boyd B. Air-cooled micro-porous heat exchangers for thermal management of fuel cells / B. Boyd, K. Hooman // *Int Commun Heat Mass Transf.* – 2012.

8. Silva A.P. A combined capillary cooling system for fuel cells / A.P. Silva, R.M. Galante, P.R. Pelizza, E. Bazzo // *Appl Therm Eng.* – 2012.

9. Garrity P.T. A flow boiling microchannel evaporator plate for fuel cell thermal management / P.T. Garrity, J.F. Klausner, R. Mei // *Heat Transf Eng.* – 2007.

10. Soupremanien U. Tools for designing the cooling system of a proton exchange membrane fuel cell / U. Soupremanien, S. LePerson, M. Favre-Marinet, Y. Bultel // *Appl Therm Eng.* – 2012.

11. Karelin D.L. Math Modeling and Transient Characteristics Research of Vapor Compression Cooling System / D.L. Karelin, A.V. Boldyrev, S.V. Boldyrev // *AIP Conf. Proc.* – 2019. - P. 1-3.

12. Карелин Д.Л. Математическая модель для расчета статических характеристик с учетом нерасчетных областей

режимов работы парокompрессионных систем охлаждения / Д.Л. Карелин, А.В. Болдырев, В.М. Гуреев, С.В. Болдырев // *Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2019 (МНТК ИМТОМ-2019): матер. X Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 2.* – Казань, 2019. – С. 48-51.

13. Karelin D.L. The method of comparative analysis of the effectiveness of vapor-liquid compression cooling system and conventional liquid cooling system by relative energy indicators / D.L. Karelin, A.V. Boldyrev, V.M. Gureev and etc. // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2020. – Vol.1683, is.2. – Art. № 022071. – P. 1-6.

14. Hetsroni G. A uniform temperature heat sink for cooling of electronic devices / G. Hetsroni, A. Mosyak, Z. Segal, G. Ziskind // *Int J Heat Mass Tran.* – 2002.

15. Zhang L. Measurements and modeling of two-phase flow in microchannels with nearly constant heat flux boundary conditions / L. Zhang, Z.M. Koo, L. Jiang, M. Asheghi // *J Microelectromech Syst.* – 2002.

DOI: 10.24892/RIJE/20230305

Analysis of Evaporative and Liquid Cooling Methods for Fuel Cell Stack by the Method of Relative Energy Indicators

Karelin D.L., Boldyrev A.V., Boldyrev S.V., Kolbina T.Y.

Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny Institute

Naberezhnye Chelny, Russian Federation

alexeyboldyrev@mail.ru

Abstract. In the article, a numerical research of the heat transfer process in a fuel cell with a proton-exchange membrane was carried out utilization liquid and evaporative cooling systems. The result shows that the evaporative cooling system makes it possible to maintain a smaller temperature difference across the bipolar

plate, thus providing greater stability of the fuel cell parameters and increasing its efficiency.

Keywords: fuel cell, liquid cooling system, evaporative cooling system, bipolar plate temperature.

Библиографическое описание статьи

Карелин Д.Л. Анализ испарительного и жидкостного методов охлаждения блоков топливных элементов методом относительных энергетических показателей / Д.Л. Карелин, А.В. Болдырев, С.В. Болдырев, Т.Ю. Колбина // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал.* – 2023. – Т.10, №3. – С. 25-28. DOI: 10.24892/RIJE/20230305

Reference to article

Karelin D.L., Boldyrev A.V., Boldyrev S.V., Kolbina T.Y. Analysis of evaporative and liquid cooling methods for fuel cell stack by the method of relative energy indicators, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2023, vol.10, no.3, pp. 25-28. DOI: 10.24892/RIJE/20230305