

УДК 629.5.064

## Система охлаждения судовой энергетической установки на водородных топливных элементах

Тимашпольский Ян Михайлович<sup>(\*)</sup>

ian.timash@yandex

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Аннотация.** Рассмотрены технические особенности систем охлаждения (СО) для судовых энергетических установок (СЭУ) на основе водородных топливных элементов (ТЭ). Представлен анализ тепловых нагрузок, генерируемых ТЭ различной мощности, и требований к температурным режимам их работы. Показано, что эффективность и надежность всей СЭУ напрямую зависят от корректной работы СО. Сделаны выводы о необходимости применения гибридных или каскадных систем охлаждения с использованием забортной воды.

**Ключевые слова:** судовая энергетическая установка, топливный элемент, водород, система охлаждения, тепловой режим, теплообменник

## Cooling system for a marine hydrogen fuel cell power plant

Timashpolsky Ian Mikhailovich<sup>(\*)</sup>

ian.timash@yandex

BMSTU, Moscow, Russia

**Abstract.** The features and technical challenges of cooling systems (CS) for marine power plants (MPP) based on hydrogen fuel cells (FC) are considered. An analysis of the thermal loads generated by FCs of various capacities and the requirements for their operating temperature conditions is presented. It is shown that the efficiency and reliability of the entire MPP directly depend on the correct operation of the CS. Conclusions are made about the need to use hybrid or cascade cooling systems using seawater as a low-potential sink for marine applications.

**Keywords:** marine power plant, fuel cell, hydrogen, cooling system, thermal regime, heat exchanger

**Введение.** Активная декарбонизация мирового судоходства обуславливает растущий интерес к водородным технологиям. Судовые энергетические установки на основе топливных элементов (ТЭ) представляют собой ключевое решение для достижения нулевых выбросов. Однако их внедрение сопряжено с рядом технических сложностей, среди которых одной из наиболее значимых является задача эффективного отвода тепла. В отличие от традиционных дизельных установок, где значительная часть тепла утилизируется с выхлопными газами, ТЭ выделяют тепло непосредственно в корпус судовой установки, при этом их КПД составляет 50–60 %, а остальная энергия преобразуется в тепло, которое необходимо отводить для предотвращения перегрева и деградации мембран [1]. Таким образом, разработка высокоэффективной

и надежной системы охлаждения (СО) является критически важной для обеспечения работоспособности и долговечности судовой водородной установки СЭУ [2]. Целью данной статьи является анализ специфических требований к СО судовых ТЭ, обзор возможных конфигураций и обоснование выбора оптимальных решений.

**Материалы и методы.** Для анализа тепловых нагрузок был проведен расчет баланса энергии для ТЭ типа PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) мощностью 100 кВт, характерной для речных пассажирских прогулочных судов, малых паромов и буксиров [3]. Тепловая мощность рассчитывалась по формуле:

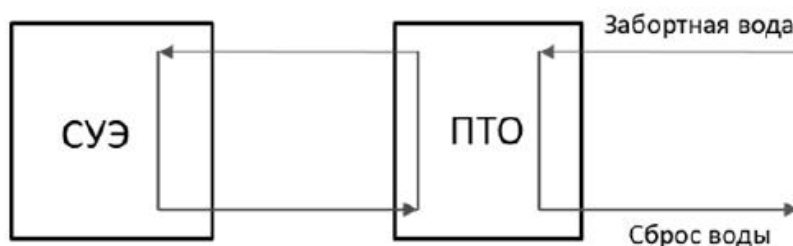
$$Q_{\text{тепл}} = P_{\text{эл}} \cdot \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right), \quad (1)$$

где  $P_{\text{эл}}$  — электрическая мощность установки, кВт;  $\eta$  — КПД ТЭ.

Принято  $\eta = 0,55$ . Таким образом, для  $P_{\text{эл}} = 100$  кВт,  $Q_{\text{тепл}} \approx 82$  кВт.

Были рассмотрены конфигурации СО с использованием в качестве конечного хладоносителя речной воды [4–6]. Учтены ее особенности: повышенное содержание взвешенных частиц по сравнению с морской водой, но меньшая коррозионная активность. Рассматривалась двухконтурная система: внутренний контур (деионизированная вода + гликоль) и внешний контур (речная вода) с промежуточным теплообменником.

**Результаты.** Расчет по формуле (1) показал, что для ТЭ мощностью 100 кВт требуется отвести около 82 кВт тепла. Двухконтурная система охлаждения остается оптимальной для защиты дорогостоящего оборудования водородной энергоустановки на ТЭ от загрязнений и коррозии (см. рисунок).



Принципиальная схема двухконтурной системы охлаждения судовой ЭУ на ТЭ для речного судна

Для внешнего контура с речной водой наиболее предпочтителен разборный пластинчатый теплообменник. Его ключевые преимущества — высокая компактность и эффективность — являются определяющими для судовых применений. Риск загрязнения, связанный с речной водой, эффективно устраняется установкой стандартных фильтрующих элементов (сетчатых фильтров) на входе забортной воды и периодической промывкой контура.

**Обсуждение полученных результатов.** Полученные результаты свидетельствуют, что для маломощных (100 кВт) СЭУ речных судов тепловая

нагрузка является значительной, но решаемой. Ключевым отличием от морских систем является отсутствие коррозионной опасности от солей, однако присутствует риск засорения взвешенными частицами. Это смещает приоритет в выборе теплообменника в сторону компактности и эффективности, так как массогабаритные показатели для малых судов критичны [7].

Таким образом, для проектов экологически чистых речных судов, аналогичных рассматриваемым в российских программах судостроения, применение пластинчатых теплообменников является прогрессивным и оптимальным решением, обеспечивающим лучшие массогабаритные и эксплуатационные характеристики по сравнению с традиционными кожухотрубными аналогами.

**Заключение.** Проведенный анализ показал, что система охлаждения является критически важным элементом СЭУ на водородных ТЭ мощностью 100 кВт для речных судов. Наиболее целесообразной признана двухконтурная система. В качестве основного варианта для внешнего контура, работающего на речной воде, рекомендован разборный пластинчатый теплообменник, который, при оснащении системой фильтрации и организации регулярного обслуживания, сочетает в себе преимущества высокой компактности, эффективности теплообмена и ремонтпригодности. Данное решение ориентировано на применение в перспективных проектах речных судов, таких как прогулочные и пассажирские суда для внутренних водных бассейнов.

## Список источников

- [1] *Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU)*. Project Report. Collaborative Projects Coordination and Support Actions, 2021.
- [2] Coraddu A., Oneto L., Baldi F., Anguita D. Cooling system design for marine fuel cells: a review. *Journal of Marine Engineering and Technology*, 2020, vol. 19, sup. 1, pp. 130–145. <https://doi.org/10.1080/20464177.2019.1669981>
- [3] *Alfa Laval Plate heat exchangers in marine applications: technical handbook*. A product catalogue for HVAC, 2022.
- [4] *IEA (International Energy Agency)*. *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities*. Report prepared for the G20. Japan, 2019.
- [5] *ZEMSHIPS Project Consortium*. *ZEMSHIPS (Zero Emission Ships)*. Final Public Report, 2014.
- [6] Багаев В.А., Богданов С.Д. Перспективы использования водородных топливных элементов в судовой энергетике внутреннего водного транспорта России. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2023, № 4 (70), с. 42–49.
- [7] ГОСТ 34233.1–2017 (ЕН 1049–97). *Судостроение. Теплообменные аппараты судовые. Общие технические условия*. Москва, Стандартинформ, 2019, 35 с.



**Б4**

**Промышленная  
и экологическая  
безопасность**

