

THE USE OF FUEL CELLS IN THE ENERGY SUPPLY OF WATER TRANSPORT

G. E. Zhivljuk, A. P. Petrov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The subject of this study is the analysis of the possibilities for further growth of the energy efficiency of marine power plants through the use of the fuel cells concept. It is noted that the increase in the efficiency of modern power plants using heat engines is constrained by the limitations imposed on their efficiency coefficient (efficiency) by Carnot's theorem. Currently, the prospects for increasing the efficiency of piston engines, as the main sources of energy in marine power plants, are considered as practically exhausted. In this regard, an urgent task of improvement is the search for new technical solutions that do not fall under the mentioned restrictions, which, in particular, leads to the concept of fuel elements (TE). Fuel cell technologies, unlike heat engines, use the other ways of converting the latent energy of fuel and fundamentally allow us to reach a new level of energy efficiency with an increase in efficiency by 10 % or more. The main advantages and disadvantages of the main types of fuel and energy sources and the possibility of their use as the major sources of energy in shipbuilding are considered in the paper. The most promising types of fuel cells for marine use are identified, their investment attractiveness is determined. The special attention is paid to the problems of using and storing the main fuel for thermal power plants, which is hydrogen. On the basis of the developed technologies for the use of liquefied natural gas (LNG), the comparison of individual, most significant in operation properties of hydrogen with the properties of LNG is made. The potential risks arising from the use of hydrogen as the main fuel on ships are assessed. Based on the examples of the developed projects of power plants with fuel cells, conclusions about the prospects of using fuel cells in shipbuilding are made.

Keywords: marine power plant, energy efficiency, fuel cells, hydrogen fuel, prospects for use.

For citation:

Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. "The use of fuel cells in the energy supply of water transport." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 14.1 (2022): 104–119. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-104-119.

УДК 621.43.074

ПРИМЕНЕНИЕ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИИ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Г. Е. Живлюк, А. П. Петров

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Предметом настоящего исследования является анализ возможностей дальнейшего роста энергоэффективности судовых энергетических установок за счет использования концепции топливных элементов. Отмечается, что повышение эффективности современных энергетических установок, использующих тепловые двигатели, сдерживается ограничениями, накладываемыми на их коэффициент полезного действия теоремой Карно. В настоящее время перспективы роста КПД поршневых двигателей в качестве основных источников энергии в судовых энергетических установках рассматриваются как практически исчерпанные. В этой связи актуальной задачей совершенствования является поиск новых технических решений, не подпадающих под указанные ограничения, который, в частности, приводит к концепции топливных элементов. Технологии топливных элементов, в отличие от тепловых двигателей, предполагают использование иных способов преобразования скрытой энергии топлива, принципиально позволяя выйти на новый уровень энергоэффективности с повышением КПД на 10 % и более. В работе рассмотрены главные преимущества и недостатки основных видов топливных элементов и возможность их применения в качестве основных источников энергии в судостроении. Выделены наиболее перспективные

виды топливных элементов для судового использования, определена их инвестиционная привлекательность. В работе уделено отдельное особое внимание проблемам использования и хранения основного вида топлива для топливных элементов, которым является водород. На основе разработанных технологий использования сжиженного природного газа (LNG) выполнено сопоставление отдельных, наиболее значимых в эксплуатации свойств водорода со свойствами LNG. Дана оценка потенциальных рисков, возникающих при использовании водорода в качестве основного топлива на судах. На примерах разрабатываемых проектов энергетических установок с топливными элементами сделаны выводы о перспективах использования топливных элементов в судостроении.

Ключевые слова: судовая энергетическая установка, энергоэффективность, топливные элементы, водородное топливо, перспективы использования.

Для цитирования:

Живлюк Г. Е. Применение топливных элементов в энергообеспечении водного транспорта / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 104–119. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-104-119.

Введение (Introduction)

Выброс парниковых газов (ПГ) судовыми энергетическими установками (СЭУ) является глобальной проблемой мировой судоходной отрасли. Решению данной проблемы может способствовать как повышение энергетической эффективности СЭУ, так и использование альтернативных низкоуглеродных, углеродно-нейтральных и безуглеродных видов топлива [1]. Повышение энергоэффективности судов [2], являясь одним из постоянно разрабатываемых направлений в современном судостроении, способно внести весомый вклад в сокращение эмиссии ПГ. Однако тепловые двигатели, используемые на подавляющем большинстве судов, преобразуя тепловую энергию, полученную в результате сгорания углеводородов в работу, имеют ограничение по своему КПД в соответствии с теоремой Карно. Так, большеразмерные двухтактные малооборотные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) обеспечивают КПД, равный 50 % и более, что фактически является значением, близким к предельно достижимому. Такими двигателями оборудованы энергетические установки до 55 % транспортных судов, которые показывают максимально достижимую энергетическую эффективность. Для преодоления барьера при дальнейшем росте КПД СЭУ, устанавливаемого теоремой Карно, необходим поиск новых технических решений для СЭУ, которые будут использовать иные, в отличие от тепловых двигателей, принципы.

Среди эффективных источников энергии, способных заменить современные поршневые ДВС, на первом месте находятся топливные элементы (ТЭ). Данные элементы как электрохимические устройства способны напрямую преобразовывать химическую энергию топлива в электроэнергию без процесса горения, а, следовательно, их КПД не попадает под ограничения теоремы Карно, что принципиально позволяет им достигать КПД, равный 80 % и более [3].

Целью предлагаемой работы является рассмотрение аспектов возможного применения топливных элементов как основы главной и вспомогательной энергетической установки судна, оценка текущей ситуации и перспектив ее использования, а также анализ топливного потенциала технологии ТЭ.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Концепция топливного элемента известна с 1839 г. Практическое применение ТЭ начинается с 1937 г., когда проф. Ф. Бэкон начал разработку своего ТЭ, создав к концу 50-х гг. XX в. топливную батарею, состоящую из 40 ТЭ мощностью 5 кВт [4]. ТЭ (рис. 1) крайне многообразны как по конструкции, так и по принципу действия.

На сегодняшний день наиболее изученным является водородно-кислородный ТЭ [5]. Электроды ТЭ изготавливаются из угля и покрываются платиной, которая выступает в роли катализатора реакций. В качестве электролита используется щелочной раствор KOH, поэтому элемент называют *щелочным ТЭ* (Alkaline Fuel Cells (AFC)) — рис. 2.

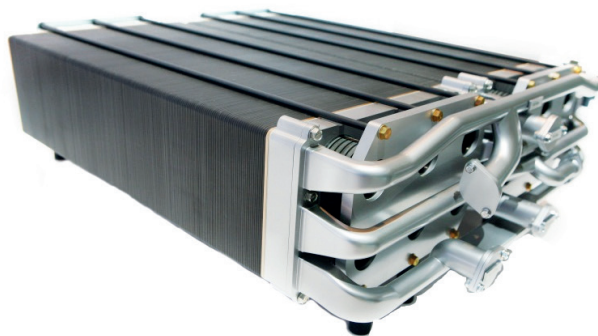


Рис. 1. Топливный элемент

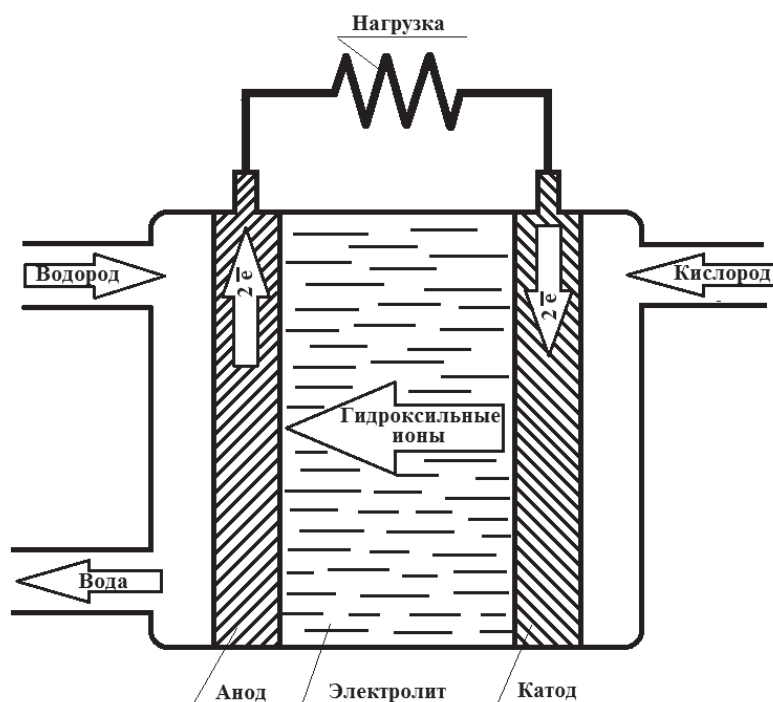
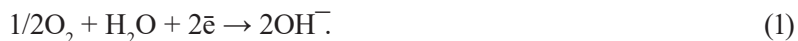


Рис. 2. Щелочной топливный элемент AFC

К катоду щелочного ТЭ подводится кислород (или воздух), который при взаимодействии с водой образует гидроксид-ионы:



К аноду подается водород, который окисляется до воды (табл. 1).



Таблица 1

Щелочные топливные элементы AFC

| | |
|------------------|---|
| Электролит | КОН (стабилизированный на матрице или циркулирующий) |
| Реагенты | H ₂ , O ₂ |
| Ион-переносчик | OH ⁻ |
| Электроды | Катод: Ni (с добавками) Анод: Pt/C, Pt — CO/C, Pt — Pd/C |
| Анодная реакция | H ₂ + 2OH ⁻ → 2H ₂ O + 2e ⁻ |
| Катодная реакция | 1/2O ₂ + H ₂ O + 2e ⁻ → 2OH ⁻ |
| Проблемы | Образование карбонатов |

В ТЭ поток электронов и ионов поддерживает баланс заряда и вещества в электролите. Образующаяся в результате реакции вода частично разбавляет электролит. Поток электронов во внешней цепи представляет собой электрический ток, используемый для совершения работы. Размыкание цепи, так же, как и прекращение движения ионов (подачи топлива или кислорода), останавливает работу топливного элемента. Электродвижущая сила АФС составляет 1–1,5 В, а высокая плотность тока достигается в элементах, работающих при повышенной температуре (около 250 °С) и высоком давлении 20 бар и более (современные ТЭ способны эффективно работать при более низких значениях температуры и давления). Для получения высоких напряжений элементы объединяются в последовательно соединенную батарею ТЭ, а для увеличения тока ТЭ соединяют параллельно, возможна также комбинация соединений.

Возникает аналогия между рассматриваемым топливным элементом и щелочным аккумулятором. Отличительной чертой ТЭ служит то, что он не способен аккумулировать энергию, как это происходит в гальваническом элементе, а работает только при подаче вещества извне, в то время как в реакционную зону гальванического элемента ограниченное количество активного вещества вводится в процессе изготовления или зарядки аккумулятора.

Наличие щелочного раствора несколько ухудшают эксплуатационные свойства АФС ввиду конструктивных требований к герметизации. Поэтому более широкое распространение получают ТЭ с протонообменной мембраной (Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC)). В этих элементах вместо жидкого электролита между электродами расположена полимерная ионообменная (протонообменная) мембрана, которая пропускает протоны, а электроны движутся по внешней цепи, образуя постоянный ток. Такой элемент не требует герметизации корпуса, так как не имеет жидкой фракции в своей активной зоне. Образующаяся в процессе работы вода не растворяет электролит и может быть легко удалена. Принцип действия ТЭ PEMFC показан на рис. 3, характеристики приведены в табл. 2.

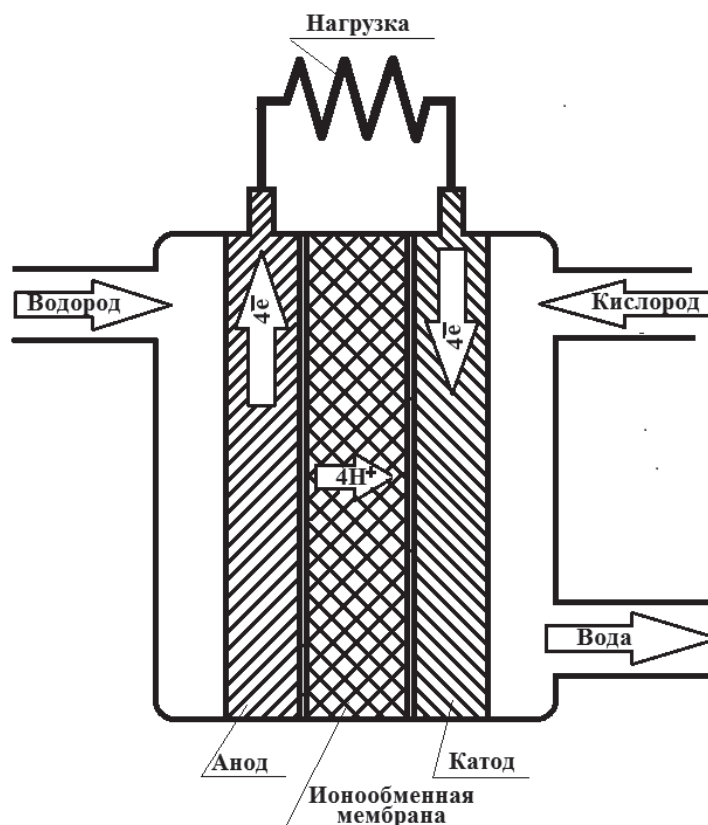
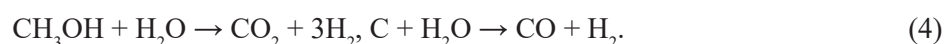
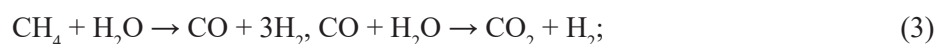


Рис. 3. Топливный элемент PEMFC с протонообменной мембраной

Водородные ТЭ PEMFC с H⁺ проводящей мембраной

| | |
|------------------|--|
| Электролит | Ионообменная мембрана (поликислота) |
| Реагенты | H ₂ , воздух (O ₂) |
| Ион-переносчик | H ⁺ |
| Электроды | Катод: Pt/C Анод: Pt/C, Pt — Ru/C |
| Анодная реакция | H ₂ → 2H ⁺ + 2ē |
| Катодная реакция | 1/2O ₂ + 2H ⁺ + 2ē → H ₂ O |
| Проблемы | Отравление анодной платины монооксидом углерода, гидратация – дегидратация |

Помимо чистого водорода в качестве топлива в ТЭ могут быть использованы природные углеводородные топлива, но с приемлемой скоростью в топливном элементе может окисляться лишь водород, а в специальных видах ТЭ — монооксид углерода и метанол. Поэтому природные виды углеводородных топлив предварительно конвертируются в блоке подготовки топлива в водород и другие газы, например, по реакциям для метана и метанола:



Продукты конверсии подаются в ТЭ. Поскольку реальный КПД ТЭ (40...65 %) ниже 100 %, при их работе выделяется тепло, которое может быть использовано либо для теплофикации, либо для генерации дополнительной электрической энергии с помощью паровых или газовых турбин. Рабочие температуры топливных элементов с протонообменной мембраной могут достигать 200 °С и более. Такие элементы классифицируются как среднетемпературные, а применительно к PEMFC — как высокотемпературные (HT PEMFC).

Топливные элементы, способные работать на метаноле, выделяют в отдельную группу и называют *метанольные ТЭ* (Direct Methanol Fuel Cells (DMFC)) — табл. 3 и рис. 4.

Метанольные топливные элементы DMFC с H⁺ проводящей мембраной

| | |
|------------------|--|
| Электролит | Ионообменная мембрана (поликислота) |
| Реагенты | CH ₃ OH, воздух (O ₂) |
| Ион-переносчик | H ⁺ |
| Электроды | Катод Pt/C Анод Pt-Ru/C (Os, Rh ...) |
| Анодная реакция | CH ₃ OH + H ₂ O → CO ₂ + 6H ⁺ + 6ē |
| Катодная реакция | 3/2O ₂ + 6H ⁺ + 6ē → 3H ₂ O |
| Проблемы | Гидратация — дегидратация |

Отдельный интерес представляют топливные элементы на фосфорной кислоте (с фосфорнокислым электролитом) (Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC)). Мощность созданных установок с батареями таких ТЭ достигает 11 МВт, топливные элементы этого типа могут использовать дисциллированные виды углеводородных топлив без содержания серы. При умеренной рабочей температуре до 200 °С, в фосфорнокислых ТЭ реализуется эффективность до 80 %. В табл. 4 приведены основные параметры элемента, на рис. 5 — его структура.

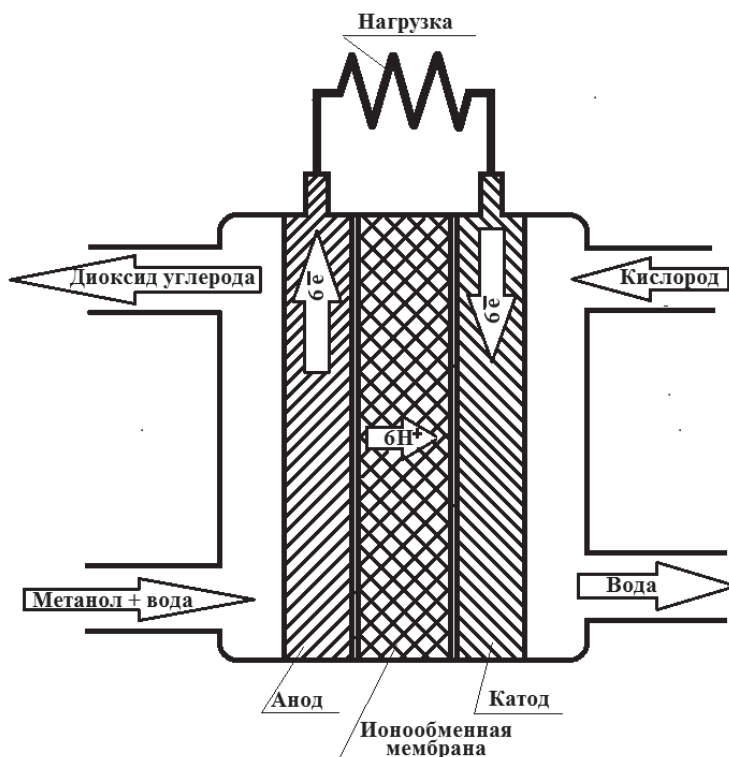


Рис. 4. Метанольный топливный элемент DMFC

Таблица 4

Топливный элемент PAFC на фосфорной кислоте

| | |
|------------------|---|
| Электролит | НЗРО4 (на твердом носителе SiC или др.) |
| Реагенты | H ₂ , воздух (O ₂) |
| Ион-переносчик | H ⁺ |
| Электроды | Катод Pt/C, Pt – WO ₃ /C Анод Pt/C, Pt – Ru/C |
| Анодная реакция | H ₂ → 2H ⁺ + 2ē |
| Катодная реакция | 1/2O ₂ + 2H ⁺ + 2ē → H ₂ O |
| Проблемы | Очень агрессивный электролит, разрушение электродов, отравление CO (не так критично при высоких температурах) |

Все рассмотренные ранее топливные элементы относятся к низкотемпературным и среднетемпературным ТЭ, общей отличительной чертой которых является использование в качестве катализатора весьма дорогостоящей платины. Вследствие этого недостатками являются:

- высокая стоимость ТЭ;
- ограниченное количество катализатора ввиду дефицита природных запасов платины;
- платиновые электроды, резко снижающие свою активность («отравляются») под воздействием примесей — каталитических ядов, например, монооксида углерода, соединений серы и др.

Кроме рассмотренных низкотемпературных и среднетемпературных ТЭ, известны высокотемпературные элементы, которые включают два типа ТЭ. Первый тип имеет электролит из расплава карбонатов лития и натрия, находящихся в порах керамической матрицы. В качестве материалов электродов используются: для катода — оксиды никеля и лития; для анода — никель, легированный хромом. Во втором типе высокотемпературных элементов используется твердый электролит на основе оксидов циркония и иттрия, в качестве анода — никель, модифицированный оксидом циркония, в качестве катода — окисные полупроводниковые соединения [6], [7].

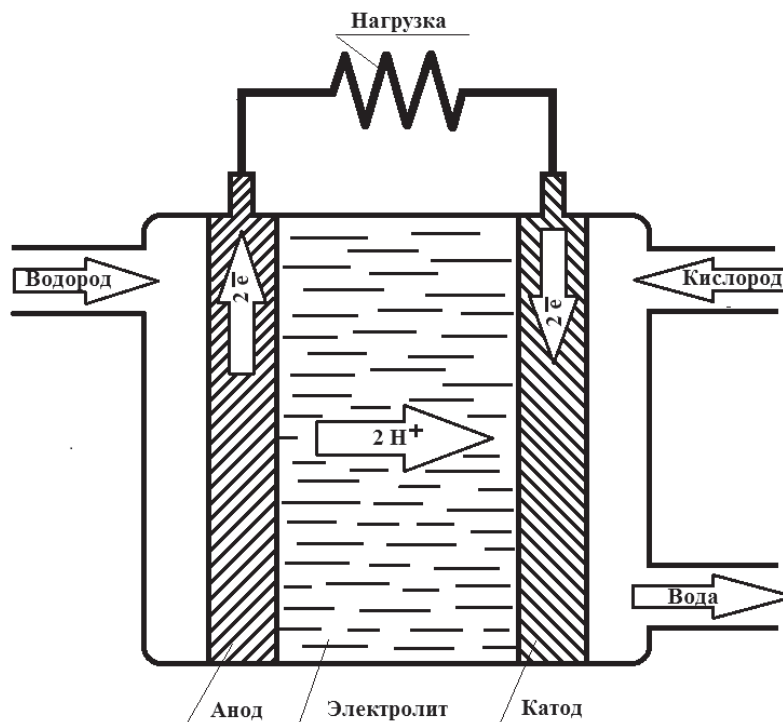


Рис. 5. Топливный элемент PAFC с кислотным электролитом фосфорной кислоты

Топливные элементы на расплавах карбонатов или жидкометаллические карбонатные ТЭ (Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC)), работая при высоких температурах, способны использовать топливо более низкого качества с достижением эффективности, равной 60 %. Переносчиком заряда в этих ТЭ являются ионы оксида углерода CO_3^{2-} , реакции и принцип действия MCFC показаны в табл. 5 и на рис. 6.

Таблица 5

Топливные элементы MCFC на расплавах карбонатов

| | |
|------------------|---|
| Электролит | $\text{LiKCO}_3, \text{LiNaCO}_3$ на матрице $\text{LiAlO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ |
| Реагенты | Ископаемый метан, синтезированные газы (H_2, CO и др.), O_2 |
| Ион-переносчик | CO_3^{2-} |
| Электроды | Катод $\text{NiO}, \text{LiFeO}_2$ и др. Анод $\text{Ni} - \text{Al}, \text{Ni} - \text{Cr}$ |
| Анодная реакция | $\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\bar{e}$ |
| Катодная реакция | $1/2\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\bar{e} \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$ |
| Проблемы | Попадание частиц NiO в электролит, работа с горючими газами при высоких температурах |

Второй тип высокотемпературных топливных элементов используют в качестве электролита твердую непористую керамическую композицию и называются *твердооксидными* ТЭ (Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)). Такой состав обеспечивает ТЭ прочную конструкцию. Высокие развиваемые рабочие температуры (до 1000°C) позволяют использовать любые виды углеводородных топлив без предварительной обработки, однако требуют длительного времени для запуска. КПД производимой электрической энергии является самым высоким из всех ранее рассмотренных ТЭ и составляет не менее 70 %, а в перспективе в доведенных до полного совершенства конструкциях может составлять до 90 %. Параметры твердооксидного ТЭ приведены в табл. 6, принцип работы показан на рис. 7.

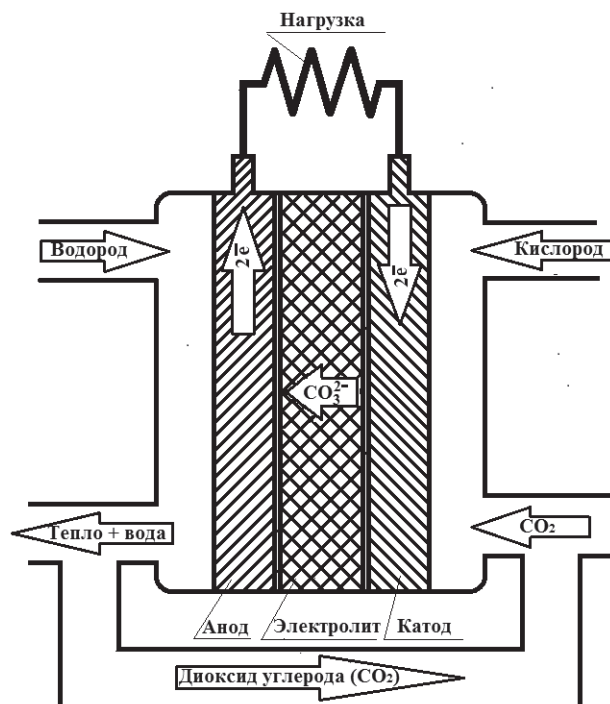


Рис. 6. Принцип жидкометаллического топливного элемента MCFC

Таблица 6

Топливные элементы SOFC на твердых оксидах

| | |
|------------------|---|
| Электролит | ZrO_2, CeO_2, Y_2O_3 |
| Реагенты | Ископаемый метан, синтезированные газы (H_2 , CO и др.), O_2 или воздух |
| Ион-переносчик | O_2^{2-} |
| Электроды | Катод $LaSrMnO_3$, лантанидные перовскиты и др. Анод $Ni (+NO)$ и др. |
| Анодная реакция | $2H_2 + O_2^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ |
| Катодная реакция | $O_2 + 2e^- \rightarrow O_2^{2-}$ |
| Проблемы | Долгосрочная стабильность материалов, работа с горючими газами при высоких температурах |

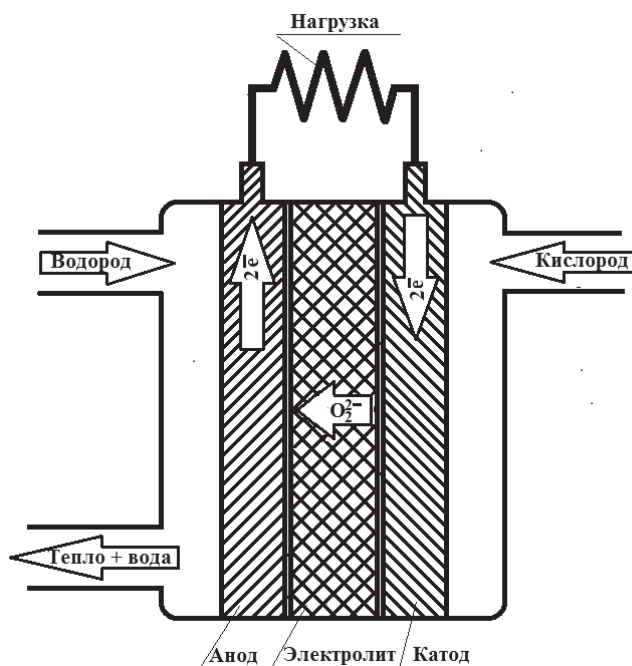


Рис. 7. Принцип действия твердооксидного топливного элемента SOFC

Для сопоставления свойств всех рассмотренных ранее топливных элементов сведем их основные параметры в табл. 7.

Таблица 7

Различные виды топливных элементов

| Вид ТЭ | Щелочные (AFC) | Водородные с H ⁺ мембраной (PEMFC) | Метанольные с H ⁺ мембраной (DMFC) | ТЭ на H ₃ PO ₄ (PAFC) | ТЭ на расплавах карбонатов (MCFC) | ТЭ на твердых окислах (SOFC) |
|-------------------------|---------------------------------------|---|---|--|-----------------------------------|------------------------------|
| Применение | Космос, транспорт, автономные системы | | | Стационарные установки, комбинированное получение электроэнергии и тепла | | |
| Рабочие температуры, °С | 60–90 | 60–90 (200) | 90–120 | 160–220 | 600–700 | 800–1000 |
| Мощность, кВт | 5–150 | 5–250 | 5 | 50–11000 | 100–2000 | 100–250 |
| КПД, % | До 70 | ≈50 | ≈50 | 50–70 | До 70 | До 70 и более |

Принципиально, что реакции в топливных элементах не обязательно должны быть реакциями окисления углеводов. В перспективе могут быть задействованы и другие электрохимические реакции, которые позволят осуществить эффективное непосредственное получение электричества, например, из цинка, натрия, магния и др. [8]. Таким образом, ТЭ являются устройствами высокой энергоэффективности. В существующих ТЭ 60–70 % и более энергии топлива непосредственно преобразуется в электричество, в то время как для современных теплоэнергетических установок с тепловыми двигателями КПД находится на уровне 40 % (с учетом КПД электрического генератора). Это отличие обусловлено тем, что процесс преобразования энергии в ТЭ не имеет промежуточной стадии генерации теплоты, и для электрохимического способа не существует ограничения цикла Карно. Такое выгодное отличие топливных элементов от тепловых двигателей постоянно вызывает интерес производителей энергетического оборудования [9], [10].

Кроме того, ТЭ перекрывают широкий диапазон мощностей, обеспечивают экологическую безопасность установок, бесшумность их работы и возможность параллельной генерации тепловой энергии. Однако широкое распространение ТЭ в современной энергетике сдерживается их высокой стоимостью и недостаточным ресурсом, который составляет порядка 8000 ч. Также немаловажной проблемой является утилизация отработавших ТЭ. Для нужд транспортных энергетических установок топливные элементы выявляют еще один недостаток — низкую динамику изменения генерируемой мощности. Пути преодоления этого недостатка представляются в виде создания дополнительных систем накопительных аккумуляторов, отдающих необходимое количество электроэнергии в переходных процессах.

Топливные элементы ранее использовались в основном для специальных целей, таких как аэрокосмическая и питание пропульсивного комплекса подводных кораблей ВМФ [11]. В современном машиностроении технология ТЭ достигла определенного уровня развития и находится в коммерческом использовании в таких приложениях, как вилочные погрузчики, резервные генераторы / источники бесперебойного питания, а также комбинированные теплоэнергетические системы. Топливные элементы находят коммерческое применение в легковых, автобусных, грузовых и железнодорожных транспортных средствах. Масштабное производство топливных элементов для грузовых и легковых автомобилей было объявлено ведущими изготовителями в апреле 2019 г. [12]. Тестирование возможности использования ТЭ для применений в качестве СЭУ проводилось в течение последнего десятилетия, однако топливные элементы в судостроении все еще находятся на начальных стадиях внедрения.

Учитывая специфику конфигурации судовых систем, которые должны иметь соответствующую конструкцию для использования произведенной электроэнергии, в настоящее время определено в общей сложности 23 проекта для судового применения ТЭ. Они включают оценку

потенциала использования топливных элементов, разработку правил, технико-экономическое обоснование и испытание топливных элементов на судах. Европейским агентством по безопасности на море проверены семь технологий ТЭ и сделан вывод о том, что твердооксидный топливный элемент (SOFC), топливный элемент с протонообменной мембраной (PEMFC) и высокотемпературный HT-PEMFC являются наиболее перспективными для морского использования [13]. Несмотря на то, что между указанными технологиями существует много общего, они имеют различия по важным аспектам, таким как сложность установки, варианты топлива, допуск на примеси в топливе и общая эффективность, включая рекуперацию отработанного тепла. Сравнение их характеристик приведено в табл. 8.

Таблица 8

Перспективы применения топливных элементов в судостроении

| Топливные элементы | | PEMFC | HT-PEMFC | SOFC |
|---|--|--|--|-------------|
| Технические характеристики | Типичное применение | Морские (каботажные, трамповые и т. п.) и вспомогательные суда | | |
| | Мощность | < 400 кВт | < 30 кВт | > 100 кВт |
| | Срок службы элемента | Умеренный | Неизвестно | Умеренный |
| | Эффективность производства электроэнергии, КПД | 50–60 % | | ~60 % |
| | Рабочая температура | 50–90 °С | 140–200 °С | 500–1000 °С |
| | Способность к изменению нагрузки | Высокая | Средняя | Низкая |
| | Чувствительность к примесям в топливе | Высокая | Низкая | Низкая |
| | Апробированность технологии | Высокая | Низкая | Умеренная |
| Энергетическая плотность элемента | | Высокая | Высокая | Умеренная |
| Потенциальная экологическая безопасность при работе на водороде | | 100%-е отсутствие выбросов вредных веществ | | |
| Относительная стоимость (среди прочих топливных элементов) | | Низкая | Умеренная | Высокая |
| Гибкость в использовании топлива | Ископаемое | Только водород | Водород, сжиженный природный газ, морской газойль, метанол | |
| | Не ископаемое | Только водород | Водород, сжиженный биогаз, биодизельное и другие виды биотоплива | |
| Текущее использование | Суда на водороде по заказам | В перспективе планируется постройка новых паромов | | |

Ранее отмечалось, что в настоящее время ТЭ являются дорогостоящим вариантом по сравнению с традиционными преобразователями энергии. Это связано со значительно более высокими капитальными затратами. Также могут оказаться достаточно высокими эксплуатационные расходы в зависимости от используемого топлива. Первоначальные инвестиционные затраты варьируются от 2000 до 6000 долл. США на 1 кВт генерируемой ТЭ энергии, в то время как традиционные дизельные энергетические установки имеют аналогичные затраты практически на порядок меньше. Самыми дешевыми являются топливные элементы PEMFC, стоимость которых составляет около 1500–2860 долл. США / кВт при стоимости установки 510 000 долл. США [13]. Так, например, в рамках проекта SF-BREEZE в США была изучена экономическая целесообразность высокоскоростного пассажирского парома, работающего исключительно на водородных топливных элементах, где стоимость топливного элемента PEMFC составляла 2500 долл. США за 1 кВт. В настоящее время капитальные затраты при постройке судна оцениваются в 1,5–3,5 раза выше, чем сопоставимого по цене дизельного парома.

Расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание альтернативной СЭУ на топливных элементах оценивается в два–восемь раз больше, чем для сопоставимого дизеля из-за высоких текущих затрат на замену батарей. Кроме того, если сравнить стоимость самого дорогого жидкого низкосернистого топлива, потребляемого энергетической установкой, то она окажется в три–пять раз ниже, чем в настоящее время стоимость невозобновляемого сжиженного водорода (LH_2), используемого для аналогичных целей¹.

Дополнительные экономические проблемы возникают при замене ячеек ТЭ как наиболее изнашиваемой части установки. Некоторые эксперты оценивают такие расходы в 50–60 % капитальных затрат на топливный элемент. Существуют значительные различия в доступных данных, указывающих интервалы замены ТЭ. Большинство исследований свидетельствуют о том, что жизненный цикл энергетической установки с ТЭ составляет 20–30 лет, тогда как срок службы элементов активной зоны ТЭ в настоящее время составляет два–три года, и некоторые производители стремятся увеличить ресурс до семи лет. Так, согласно проведенным исследованиям Shell², ожидаемая продолжительность жизни для двух наиболее перспективных технологий составляет 60 000 ч для топливных элементов PEMFC и до 90 000 ч для твердооксидных топливных элементов.

Несмотря на то, что, как отмечалось ранее, топливные элементы способны использовать различные углеводородные топлива, основным видом топлива для наиболее перспективных ТЭ является водород. Водород в современной энергетике рассматривается как самый экологичный вид носителя энергии, использование которого не нарушает углеродный баланс атмосферы, поскольку единственным продуктом окисления водорода является вода. При этом, в отличие от достаточно широко используемого в качестве топлива природного газа (LNG), водород обладает специфическими свойствами, существенно отличающимися от свойств метана как основного компонента природного газа, включая низкую плотность водорода, низкую энергию воспламенения, широкий диапазон воспламеняемости и потенциальную взрывоопасность. В табл. 9 представлено сопоставление отдельных наиболее значимых в эксплуатации параметров водорода и метана [14], [15].

Таблица 9

Сопоставление свойств водорода H_2 и метана CH_4

| Свойство | Водород | Метан | Риски, потенциально возникающие в эксплуатации при использовании водорода в качестве топлива |
|---|--------------------------|-------------------------|--|
| Плотность газа при нормальных условиях | 0,0827 кг/м ³ | 0,659 кг/м ³ | Несмотря на высокую «летучесть» водорода, способствующую высокой рассеиваемости водорода в случае утечки, истекающая струя водорода может распространяться дальше, чем для метана (см. в таблице далее). |
| Концентрационные пределы топливоздушной смеси, способной к воспламенению при 25 °С, 101,3 кПа | 4–75 % об. | 5–17 % об. | При образовании водородного облака воспламеняющийся объем окажется существенно больше, чем у аналогичного облака метана |
| Температура самовоспламенения | 585 °С | 537 °С | Риски отсутствуют |
| Минимальная энергия активации для воспламенения | 0,017 мДж | 0,27 мДж | Несмотря на более высокую температуру самовоспламенения водородной топливоздушной смеси по сравнению с метановой, воспламенение водородной смеси при достижении температуры происходит легче и быстрее |

¹ Sandia, 'Feasibility of the SF-BREEZE: a Zero-Emission, Hydrogen Fuel Cell, High-Speed Passenger', Sandia report, SAND2016–9719, September 2016, accessed at <https://energy.sandia.gov>. Sandia.

² Shell (2017), 'Energy of the Future? Sustainable Mobility through Fuel Cells and H₂', Shell/Wuppertal Hydrogen Study, accessed at <https://epub.wupperinst.org>.

Таблица 9
 (Продолжение)

| | | | |
|---|--|-------------------------------|--|
| Температура кипения при нормальном давлении | -253 °С | -161 °С | Системы хранения водорода (в случае хранения в сжиженном состоянии (LH ₂)) устанавливают более жесткие требования к организации объемов для хранения, чем сжиженный природный газ (LNG). При этом необходимо учитывать, что LH ₂ , в отличие от LNG, способен конденсировать кислород в воздухе, что, в свою очередь, может быть связано с малоизученными криогенными эффектами |
| Низшая теплотворная способность | 120 кДж/г | 50 кДж/г | Учитывая низкую плотность водорода, для газов, находящихся при равном давлении, энергия, выделяемая для водорода, составляет около 85 % от энергии, выделяемой для метана. Исходя из этого, параметр дополнительных рисков не создает |
| Максимальная скорость горения в воздухе при нормальных условиях | 265–325 см/с | 37–45 см/с | Высокая скорость распространения пламени для водорода приведет к более резкому по сравнению с метаном росту давления в замкнутых объемах |
| Детонационная способность, измеряемая в минимальной массе тетрила | 0,8 г | 16 000 г | Более высокая по сравнению с метаном склонность водорода к развитию детонационных процессов способна с учетом высокой скорости распространения пламени (см. ранее), значительно увеличить интенсивность взрыва, особенно в замкнутых объемах |
| Коэффициент ламинарной диффузии при нормальных условиях | 0,61 см ² /с | 0,16 см ² /с | Незначительное влияние на дисперсию, в которой преобладает турбулентная диффузия. Более важным фактором являются высокая скорость потока и низкая плотность водорода, связанные с большей длиной водородных импульсных струй по сравнению с истечением метана |
| Скорость звука при нормальных условиях | 1 294 м/с | 446 м/с | Способствует увеличению объемного расхода водорода по сравнению с метаном при возникновении утечек в надкритическом режиме истечения, однако водород, обладая более высокой скоростью звука, имеет меньшую плотностью. Поэтому параметры компенсируют друг друга, что приводит к одинаковому импульсу струи при истечении метана и водорода в равных условиях |
| Эффект Джоуля – Томсона при снижении давления | Вызывает небольшое повышение температуры | Вызывает снижение температуры | Ограничивает скорость бункеровки при использовании сжатого водорода в обеспечении сдерживания температуры в резервуаре хранения. Однако влияние незначительно, так как повышение температуры составляет несколько кельвинов |

Таблица 9
(Окончание)

| | | | |
|--|---------|---------|--|
| Адиабатная температура горения | 2045 °С | 1875 °С | Водородное пламя может быть более горячим |
| Доля теплоты, передаваемая излучением пламени в окружающую среду | 17–25 % | 23–33 % | Не вызывает риски (указанные диапазоны являются ориентировочными и варьируются в зависимости от скорости тепловыделения. Существуют ограниченные крупномасштабные данные по водороду). Чистые смеси водорода и воздуха горят несветящимся, почти невидимым, бледно-голубым горячим пламенем и несмотря на то, что пламя водорода может достигать более высоких температур (до 2130 °С), чем другие газы, доля тепла, передаваемая излучением при горении водорода, обычно ниже). |

Исходя из данных, приведенных в табл. 9, следует отметить, что наибольшие риски использования водорода в качестве основного судового топлива в основном обусловлены следующими факторами:

- большим диапазоном воспламеняемости водорода (это означает, что большая часть истекающего газа может быть воспламенена);
- более низкой энергией активации водорода и, как следствие, более интенсивным воспламенением водорода (для высоких концентраций);
- меньшими расстояниями горения, необходимыми для инициирования перехода горения водорода от дефлаграции (процесс дозвукового горения, когда передача энергии от зоны реакции в направлении движения фронта происходит в основном за счет конвективной передачи, иное название — конвективное горение) к детонации, когда горение происходит со сверхзвуковой скоростью, а передача энергии — за счет разогрева реагентов от внутреннего трения при прохождении ударной волны;
- более высоким давлением взрыва при взрыве водорода.

Отдельные проблемы связаны со способами хранения запасов водорода на борту судна. Водород может храниться в газообразном сжатом (до 350 или 700 бар) или в жидком криогенном состоянии. Хранение его в баллонах под большим давлением сопряжено не только с увеличенным числом рисков, но и с крайне громоздкими системами хранения, способными выдерживать такие давления. Кроме того, сжатый водород обладает очень низкой энергетической плотностью (менее 5 МДж на литр при 350 бар), в то время как сжиженный водород (LH₂) имеет энергоплотность, практически в два раза большую. Поэтому в разрабатываемых проектах предпочтение отдается криогенным системам хранения [16]. Как следствие, использование водорода на судах требует специальных резервуаров и бункеровочных систем. Стоимость бортовых систем хранения топлива может быть значительной и, несмотря на то, что системы хранения LH₂ разрабатываются для использования на судах, опыт использования их на водном транспорте очень ограничен. Ожидается, что резервуары для хранения LH₂ на судах будут стоить дороже, чем резервуары для сжиженного природного газа, поскольку сжиженный водород необходимо хранить при гораздо более низкой температуре. Это обуславливает более высокие требования к теплоизоляции и системе резервуаров. Также при проектировании необходимо учитывать тот факт, что диапазон температур состояния водорода в жидкой фазе составляет всего 20 °С, что, в свою очередь, вызывает определенные сложности поддержания водорода в криогенном жидком состоянии и минимизации

выкипания по сравнению с криогенным жидким природным газом. Кроме того, температуры жидкого водорода оказываются ниже, чем температуры сжижения или даже затвердевания обычных попутных газов (кислород, азот и др.). Такие эффекты могут вызывать специфические проблемы при захолаживании резервуаров хранения и всего процесса бункеровки в целом.

Крайне важной проблемой использования водородных ТЭ является регулирование и безопасность. Конкретные требования к видам топлива и технологиям отсутствуют. В настоящее время они не включены в «Международный кодекс по безопасности для судов, использующих газы или иные виды топлива с низкой температурой вспышки (Кодекс IGF)». В соответствии с ч. 4 этого кодекса необходимо использовать альтернативный подход к проектированию, чтобы продемонстрировать эквивалентный уровень безопасности. Это потребует обширного и очень дорогостоящего процесса проектирования и утверждения. Несомненно, водородные системы можно сделать такими же безопасными, как системы на природном газе. Однако неблагоприятное воздействие водорода означает, что для получения системы, уровень безопасности которой эквивалентен уровню безопасности обычных углеводородных систем, могут потребоваться различные по своей сути безопасные конструкции и более высокий уровень мер предосторожности с превентивными и смягчающими мерами.

Международное сертификационное и классификационное общество DNV выпустило правила классификации для установок на топливных элементах¹, которые содержат требования к проектированию и устройству энергетических установок на топливных элементах и помещений, в которых находятся такие установки. Они охватывают все элементы установки, от первичной подачи топлива до системы отвода отработавших газов. Правила DNV не распространяются непосредственно на другие установки для использования водорода в качестве топлива. Существующие правила класса могут упростить альтернативный процесс проектирования при условии, что правила признаны соответствующей администрацией. В сотрудничестве с Норвежским морским управлением в 2018 г. DNV подготовлено резюме применимых правил для судов на топливных элементах в Норвегии. Таким образом, несмотря на потенциально высокую энергоэффективность ТЭ мощным сдерживающим фактором широкого распространения технологии ТЭ в судостроении до настоящего времени являются высокие инвестиционные и эксплуатационные затраты, а также проблемы, связанные с использованием водорода в судовых условиях. В этой связи технологию топливных элементов следует рассматривать как высокоэнергоэффективную технологию будущего.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Исчерпание потенциала возможностей повышения топливной экономичности поршневыми ДВС побуждает к поиску новых альтернативных решений для энергетических установок. Технология топливных элементов, не попадающая под ограничения теоремы Карно можно рассматривать как альтернативный ДВС, перспективный высокоэкономичный источник энергии для судовой отрасли.

2. Среди всего многообразия видов топливных элементов наибольший интерес для судовых энергетических установок представляют низкотемпературные и высокотемпературные топливные элементы с протонообменной мембраной (PEMFC и HT PEMFC соответственно), а также топливные элементы на твердых оксидах (SOFC), способные обеспечить достижение КПД в 60 %, а в перспективе до 70 % и более.

3. Наиболее привлекательным реагентом для питания топливных элементов является водород, который представляется самым экологичным видом топлива. Однако технологии хранения и использования водорода в качестве основного топлива в СЭУ в современном судостроении пока не имеют достаточного распространения и апробации.

¹ https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Five-lessons-to-learn-on-hydrogen-as-ship-fuel.html?utm_campaign=MA_21Q3_ART_Ind_350_Hydrogen_Fuel_Handbook&utm_medium=email&utm_source=Eloqua

4. Несмотря на то, что в автомобильной отрасли топливные элементы находят все более широкое распространение, опыт их использования в судостроении пока является недостаточным, технология находится на стадии апробации и формирования нормативной базы.

5. Отсутствие нормативной базы не может рассматриваться как основной сдерживающий фактор внедрения технологии ТЭ в судостроительной отрасли. В настоящее время основным препятствием для внедрения является весьма высокая инвестиционная стоимость энергетических установок с ТЭ, которая почти на порядок выше, чем стоимость дизельных энергетических установок. При этом ТЭ пока не обеспечивают требуемые ресурсные показатели и влекут высокие эксплуатационные расходы и риски.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Живлюк Г. Е. Перспективные технологии водного транспорта для ограничения парникового эффекта / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 5. — С. 730–743. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-730-743.

2. Иванченко А. А. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов / А. А. Иванченко, А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.

3. Коровин М. И. Топливные элементы и электрохимические установки / М. И. Коровин. — М.: Издательство МЭИ, 2005. — 280 с.

4. Сборник нормативно-методических материалов. Книга двадцать вторая. НД № 2–139902–27. — СПб.: Российский регистр судоходства, 2013. — 10 с.

5. Лебедева М. В. Топливные элементы — характеристика, физико-химические параметры, применение / М. В. Лебедева, Н. А. Яштулов. — М.: Мир науки, 2020. — 63 с.

6. Kupecki J. Modeling, Design, Construction, and Operation of Power Generators with Solid Oxide Fuel Cells / J. Kupecki. — Springer, Cham, 2018. — 261 p.

7. Липилин А. С. ТОТЭ и энергосистемы на их основе: состояние и перспективы / А. С. Липилин // Электрохимическая энергетика. — 2007. — Т. 7. — № 2. — С. 61–72.

8. Moorman C. E. Renewable Energy and Wildlife Conservation (Wildlife Management and Conservation) / С. Е. Moorman, S. M. Grodsky, S. Rupp. — Johns Hopkins University Press, 2019. — 271 p.

9. Мельник Г. В. Топливные элементы / Г. В. Мельник // Двигателестроение. — 2007. — № 1 (227). — С. 50–54.

10. Staffell I. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system / I. Staffell, D. Scamman, A. V. Abad, P. Balcombe, P. E. Dodds, P. Ekins, N. Shah, K. R. Ward // Energy & Environmental Science. — 2019. — Vol. 12. — Is. 2. — Pp. 463–491. DOI: 10.1039/C8EE01157E.

11. Лоскутников А. А. Термодинамический облик комбинированных энергоустановок на базе ГТУ и ТОТЭ / А. А. Лоскутников, И. М. Горюнов, Ф. Г. Бакиров // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С. П. Королёва (Национального исследовательского университета). — 2011. — № 3–1 (27). — С. 370–379.

12. Wang J. Techno-Economic Challenges of Fuel Cell Commercialization / J. Wang, H. Wang, Y. Fan // Engineering. — 2018. — Vol. 4. — Is. 3. — Pp. 352–360. DOI: 10.1016/j.eng.2018.05.007.

13. Saito N. The economic analysis of commercial ships with hydrogen fuel cell through case studies. Master Diss. / N. Saito. — Malmö, Sweden: World Maritime University, 2018. — 97 p.

14. Кухлинг Х. Справочник по физике / Пер. с нем. — 2-е изд. — М.: Мир, 1985. — 520 с.

15. Klebanoff L. Comparison of the safety-related physical and combustion properties of liquid hydrogen and liquid natural gas in the context of the SF-BREEZE high-speed fuel-cell ferry / L. E. Klebanoff, J. W. Pratt, C. B. LaFleur // International Journal of Hydrogen Energy. — 2017. — Vol. 42. — Is. 1. — Pp. 757–774. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.024.

16. Lindstad E. Potential power setups, fuels and hull designs capable of satisfying future EEDI requirements / E. Lindstad, T. I. Bør // Transportation Research Part D: Transport and Environment. — 2018. — Vol. 63. — Pp. 276–290. DOI: 10.1016/j.trd.2018.06.001.

REFERENCES

1. Petrov, Aleksandr P., and Grigorij E. Zhivljuk. "Advanced water transport technologies for limiting the greenhouse effect." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.5 (2021): 730–743. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-730-743.
2. Ivanchenko, A.A., A. P. Petrov, and G. E. Zhivljuk. "Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.
3. Korovin, M. I. *Toplivnye elementy i elektrokhimicheskie ustanovki*. M.: Izdatel'stvo MEI, 2005.
4. *Sbornik normativno-metodicheskikh materialov. Kniga dvadtsat' vtoraya. ND № 2–139902–27*. SPb.: Rossiiskii registr sudokhodstva, 2013.
5. Lebedeva, M.V., and N. A. Yashtulov. *Toplivnye elementy — kharakteristika, fiziko-khimicheskie parametry, primeneniye*. M.: Mir nauki, 2020.
6. Kupecki Jakub. *Modeling, Design, Construction, and Operation of Power Generators with Solid Oxide Fuel Cells*. Springer, Cham, 2018.
7. Lipilin, A. S. "TOTE i energosistemy na ikh osnove: sostoyaniye i perspektivy." *Elektrokhimicheskaya energetika* 7.2 (2007): 61–72.
8. Moorman, Christopher E., Steven M. Grodsky, and Susan Rupp. *Renewable Energy and Wildlife Conservation (Wildlife Management and Conservation)*. Johns Hopkins University Press, 2019.
9. Mel'nik, G.V. "Toplivnye element." *Dvigatelsestroenie* 1(227) (2007): 50–54.
10. Staffell, Iain, Daniel Scamman, Anthony Velazquez Abad, Paul Balcombe, Paul E. Dodds, Paul Ekins, Nilay Shah, and Kate R. Ward. "The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system." *Energy & Environmental Science* 12.2 (2019): 463–491. DOI: 10.1039/C8EE01157E.
11. Loskutnikov, A. A., I. M. Gorjunov, and F. G. Bakirov. "Thermodynamic shape of the combined power installations, based on GTU and solid oxide fuel cells." *Vestnik of the Samara State Aerospace University* 3–1(27) (2011): 370–379.
12. Wang, Junye, Hualin Wang, and Yi Fan. "Techno-economic challenges of fuel cell commercialization." *Engineering* 4.3 (2018): 352–360. DOI: 10.1016/j.eng.2018.05.007.
13. Saito, Naohiro. *The economic analysis of commercial ships with hydrogen fuel cell through case studies*. Master Diss. Malmö, Sweden: World Maritime University, 2018.
14. Kukhling, Kh. *Spravochnik po fizike: Per. s nem.* 2nd ed. M.: Mir, 1985.
15. Klebanoff, L.E., J. W. Pratt, and C. B. LaFleur. "Comparison of the safety-related physical and combustion properties of liquid hydrogen and liquid natural gas in the context of the SF-BREEZE high-speed fuel-cell ferry." *International Journal of Hydrogen Energy* 42.1 (2017): 757–774. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.024.
16. Lindstad, Elizabeth, and Torstein Ingebrigtsen Bø. "Potential power setups, fuels and hull designs capable of satisfying future EEDI requirements." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 63 (2018): 276–290. DOI: 10.1016/j.trd.2018.06.001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Живлюк Григорий Евгеньевич —
 кандидат технических наук, доцент
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru
Петров Александр Павлович —
 кандидат технических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: app.polab@inbox.ru, kaf_dvs@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhivljuk, Grigorij E. —
 PhD, associate professor
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru
Petrov, Aleksandr P. —
 PhD, professor
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: app.polab@inbox.ru, kaf_dvs@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 7 декабря 2021 г.
 Received: December 7, 2021.