УДК 629.5.064:621.352
EDN: JQYBIW

Е.Н. Алексин[1], Д.О. Глазырина[1], И.К. Ландграф[1, 2], Д.С. Маловик[3]
[1] ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия
[2] ООО «Центр водородной энергетики», Черноголовка, Россия
[3] ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова», Санкт-Петербург, Россия

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются судовые энергетические установки с водородом в качестве топлива. Целью работы является рассмотрение существующих перспектив и технологических вызовов декарбонизации судоходства при переходе на водородное топливо.

Материалы и методы. Проведен сравнительный анализ различных способов использования водорода: в качестве добавки к углеродному топливу, в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) и в составе электрохимических генераторов. Применение водородного топлива указывает на необходимость внедрения инновационных конструктивных и материаловедческих решений для адаптации систем охлаждения и узлов ДВС к работе на водороде с целью исключения выбросов NO_x и оксидов углерода.

Основные результаты. Определено количество получаемого диоксида углерода в зависимости от мощности для электрохимических энергоустановок (ЭХЭУ). Выполнено сравнение выбросов диоксида углерода от ЭХЭУ с получением водорода на борту в процессе паровой конверсии углеводородного топлива и от дизельного двигателя.

Заключение. В качестве наиболее эффективной альтернативы обосновывается применение ЭХЭУ, обеспечивающих более высокий КПД и полное отсутствие вредных выбросов, за исключением варианта с получением водорода на борту из углеводородного топлива, и гарантированное соответствие судна международным экологическим стандартам и рейтингам углеродной интенсивности.

Ключевые слова: водород, топливо, электрохимический генератор, электрохимическая энергоустановка, хранение водорода, снижение выбросов.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 629.5.064:621.352
EDN: JQYBIW

E.N. Aleksin[1], D.O. Glazyrina[1], I.K. Landgraf[1, 2], D.S. Malovik[3]
[1] St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia
[2] Hydrogen Energy Center LLC, Chernogolovka, Russia
[3] Kuznetsov Naval Academy, St. Petersburg, Russia

PROSPECTS FOR THE USE OF MARINE ELECTROCHEMICAL POWER PLANTS TO REDUCE POLLUTANT EMISSIONS

Object and purpose of research. The object of the research is marine power plants using hydrogen as fuel. The purpose of this work is to consider the existing prospects and technological challenges of net-zero policy in marine industry from the standpoint of hydrogen transition.

Для цитирования: Алексин Е.Н., Глазырина Д.О., Ландграф И.К., Маловик Д.С. Перспективы использования судовых электрохимических энергетических установок для снижения выбросов загрязняющих веществ. Труды Крыловского государственного научного центра. 2026; 2(416): 95–101.

For citations: Aleksin E.N., Glazyrina D.O., Landgraf I.K., Malovik D.S. Prospects for the use of marine electrochemical power plants to reduce pollutant emissions. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2026; 2(416): 95–101 (in Russian).

Materials and methods. This paper compares two possible ways to use hydrogen as fuel: as an additive to common fossil fuels in internal combustion engines or as fuel in its own right in fuel cell-based prime movers. Speaking about internal combustion engines, hydrogen fuel will require innovative designs and materials for their cooling systems and other units so as to adapt them to hydrogen and enable zero NO_x and CO_x emissions.

Main results. The authors calculated CO_2 footprint of fuel cell-based power plants and compared it with the figures for steam reforming of hydrogen aboard the ship and CO_2 emissions for diesel engines.

Conclusion. The authors argue that fuel cell-based solutions will be the best alternative to internal combustion engines featuring higher efficiency and, except those with steam reformers, zero emission levels. The ships with fuel cell propulsion will surely meet international environmental standards and carbon footprint ratings.

Keywords: hydrogen, fuel, fuel cell, fuel cell-based power plant, hydrogen storage, emission reduction.

The authors declare no conflicts of interest.

Современные тенденции по снижению выбросов загрязняющих веществ отражаются в нормативных документах, лимитирующих выбросы. В соответствии с постановлением Правительства РФ от 12.08.2010 № 623 (ред. от 17.06.2025) «Об утверждении технического регламента безопасности объектов внутреннего водного транспорта», в целях обеспечения экологической безопасности судов проектант и строитель судна обязаны принять меры для того, чтобы выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух и дымность выпускных газов главных и вспомогательных двигателей судов не превышали нормативов, установленных нормативными документами и международными договорами РФ [1].

Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ) устанавливает ограничения выбросов окислов азота при работе судовых дизельных установок в зависимости от даты постройки судна (табл. 1).

С 2023 г. также обязательным является расчет фактического и целевого коэффициента интенсивности выбросов углерода (Carbon Intensity Indicator – CII), на основе которого определяется рейтинг углеродной интенсивности судна. При низком рейтинге требуется разработка плана корректирующих действий и включение его в пересмотренный план управления энергоэффективностью судна (SSEMP) с указанием способов достижения CII [3].

Вследствие ужесточения норм по выбросам существует интерес к использованию водорода как энергоносителя в ряде направлений:

- добавка к углеводородному топливу;
- топливо в дизельном двигателе;
- топливо в электрохимическом генераторе (ЭХГ) электрохимической энергоустановки (ЭХЭУ).

Водород рассматривается как добавка в топливно-воздушную смесь дизельного двигателя (ДД), т.к. позволяет без существенной доработки базовой конструкции дизельного двигателя влиять на рабочие процессы. В данном случае при сгорании топливно-воздушной смеси снижаются сажевыделение и выход NO_x по реакции [4]:

$$2NO + 2H_2 \rightarrow N_2 + 2H_2O.$$

По сравнению с ДД с водородом в качестве добавки к углеводородному топливу перспективы использования чистого водорода как топлива в ДД заключаются в отсутствии выхода NO_x и окислов углерода [5]. Однако в данном случае необходимо внедрение инновационных конструктивных и материаловедческих решений по ключевым элементам и узлам двигателя внутреннего сгорания (ДВС), включая систему охлаждения [6].

ЭХГ обладает более высоким, относительно ДВС, КПД (вследствие прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую) и характе-

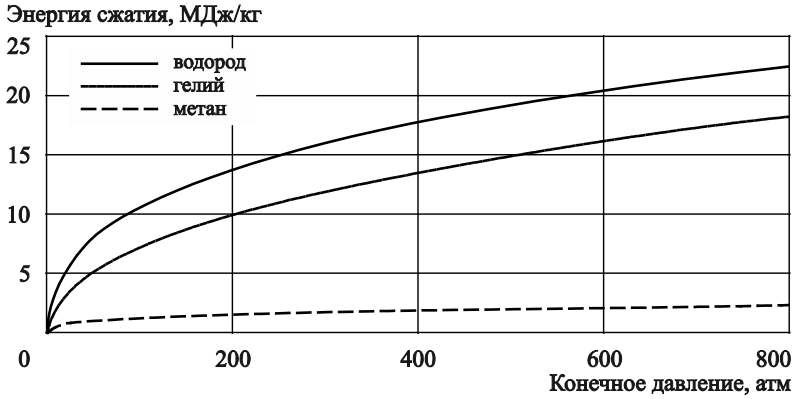
Таблица 1. Стандарты МАРПОЛ к устанавливаемым судовым дизельным установкам [2]

Table 1. MARPOL standards for marine diesels [2]

Уровень	Дата постройки судна или более поздняя	Лимит выбросов (г/кВт), где n – число оборотов (об/мин)		
		$n < 130$	$130 \le n \le 1999$	$n \ge 2000$
1	1 января 2000 г.	17,0	$45n^{-0,2}$	9,8
2	1 января 2011 г.	14,4	$44n^{-0,23}$	7,7
3	1 января 2016 г.	3,4	$9n^{-0,2}$	2,0

Рис. 1. Зависимость адиабатного сжатия для водорода, гелия и метана от атмосферного до конечного давления [9]

Fig. 1. Adiabatic compression of hydrogen, helium and methane from the atmospheric pressure to the target one [9]



ризуется отсутствием побочных продуктов в виде загрязняющих веществ в ходе реакции на низкотемпературных топливных элементах. Однако низкая объемная плотность водорода и отсутствие единого подхода к способу хранения [7, 8] приводит к необходимости анализа и выбора способа хранения и генерации водорода в составе энергетической установки.

Водород может храниться в чистом или химически связанном виде. С учетом текущего уровня развития различных способов хранения водорода и их применимости в судовых ЭХЭУ, в настоящей статье рассматриваются следующие способы хранения:

- физические – баллонное, криогенное;
- химические – гидриды металлов, паровая конверсия углеводородного топлива, пиролиз метана.

В случае хранения на борту водорода в чистом виде, передаваемого на судно с берега или судна-заправщика, также требуется учет затрат на генерацию, транспортировку, сжатие и/или ожижение водорода.

Баллонный способ хранения водорода технологически отработан и позволяет решить задачу в части лимитируемых выбросов для судовых энергетических установок. Рабочее давление может достигать 70 МПа [9] и более, при соответствии баллонов требованиям по коэффициенту запаса прочности [10]. Работа для процесса сжатия нелинейна и зависит от начального давления, зависимость представлена на рис. 1 [9].

Для хранения в жидком виде характерна значительная плотность водорода – 70,8 кг/м^3. Однако с учетом объема криогенной системы хранения и потерь на испарение хранение водорода в жидком виде в небольших количествах нецелесообразно [7]. Помимо этого, общие энергетические затраты на ожижение и хранение водорода могут составлять 30 % и более от его первичной энергоемкости.

Хранение на борту судна в связанном виде позволяет извлекать водород непосредственно для реакции на топливных элементах, что положительно сказывается на транспортировке и безопасности хранения. Способы хранения водорода представлены широкой номенклатурой материалов, аккумулирующих водород и высвобождающих его.

Аккумулирование водорода в гидридах металлов и интерметаллических соединений характеризуется низкими температурами десорбции 300–673 К, высокой объемной плотностью и низкой массовой плотностью [7, 8, 11]. Это обуславливает интерес использования гидридов металлов при хранении водорода на борту судов. В общем виде десорбция протекает по реакции:

$$MH_\beta \rightarrow MH_\alpha + H^2 + Q,$$

где M – интерметаллическое соединение; α – раствор водорода в металле, концентрация которого определяется законом Сивертса $C = k\sqrt{p}$; β – гидридная фаза.

Водородоемкость комплексных гидридов металлов может достигать 18,5 % масс., например, для $LiAlH_4$ (при этом не учитывается масса конструктивных элементов системы хранения водорода) [7].

Углеводородное топливо содержит больше водорода по объему и массе относительно интерметаллических соединений и упрощает задачу транспортировки водорода. Однако процесс генерации в случае паровой конверсии сопровождается побочными продуктами в виде окислов углерода [12] в процессе реакций:

$$C_n H_{2n+2} + n\,H_2O(\text{пар}) \rightarrow n\,CO + (2n + 1)H_2;$$

$$CO + H_2O(\text{пар}) \rightarrow CO_2 + H_2,$$

где n – углеродное число.

Таблица 2. Выход водорода по массе в зависимости от углеродного числа

Table 2. Mass output of hydrogen depending on the carbon number

Углеродное число	Выход водорода, % масс.
1	25,16
2	20,11
3	18,29
4	17,34
5	16,77

Общая реакция паровой конверсии углеводородного топлива будет иметь вид:

$$C_n H_{2n+2} + 2n\,H_2O(\text{пар}) \rightarrow n\,CO_2 + (3n+1)H_2. \quad (1)$$

Для обеспечения стабильности процесса конверсии массовое отношение водяного пара к углеводородному топливу может быть увеличено двух-трехкратно сверх стехиометрической концентрации [12]. Исходя из реакции (1) количество диоксида углерода, получаемого в процессе паровой конверсии, соотносится с углеродным числом. При допущении о полном использовании реакционной воды в реакции конверсии в табл. 2 представлен выход водорода по массе реагентов в зависимости от углеродного числа.

В результате аппроксимации данных по зависимости выхода водорода по массе от углеродного числа $n = 1\ldots15$ получена зависимость со средней ошибкой вычисления ~0,08 %:

$$H_{2,\,\%\,\text{масс.}} = 14{,}549 + 10{,}745/n.$$

Реакция пиролиза метана $CH_4 \rightarrow C + 2H_2$ не сопровождается побочными продуктами в виде окислов углерода, но приводит к значительному сажеобразованию. Расход водорода на реакцию в топливном элементе определяется в соответствии с законом Фарадея [12]:

$$G_{H_2} = M_{H_2} k_{\text{изб}} N_{\text{б}} / U_{\text{ТЭ}} nF\eta, \quad (2)$$

где M_{H_2} – молярная масса, кг/моль; $k_{\text{изб}}$ – коэффициент избытка реагента, принятый равным 1; $N_{\text{б}}$ – мощность батареи ТЭ, Вт; $U_{\text{тэ}}$ – напряжение ТЭ, В; n – число электронов; F – постоянная Фарадея, Кл/моль; η – фарадеевский КПД.

Удельный расход водорода:

$$g_{H_2} = G_{H_2} / N, \quad (3)$$

где N – мощность ЭХГ, кВт.

С использованием уравнений (2), (3) определено количество получаемого диоксида углерода в зависимости от мощности. Выполнено сравнение выбросов диоксида углерода от ЭХЭУ с получением водорода на борту в процессе паровой конверсии углеводородного топлива и от дизельного двигателя при следующих допущениях:

- в дизельном двигателе происходит полное сгорание топлива без образования сажи в ходе реакции:

$$C_n H_{2n+2} + (3n+1)/O_2 \rightarrow n\,CO_2 + (n+1)H_2O;$$

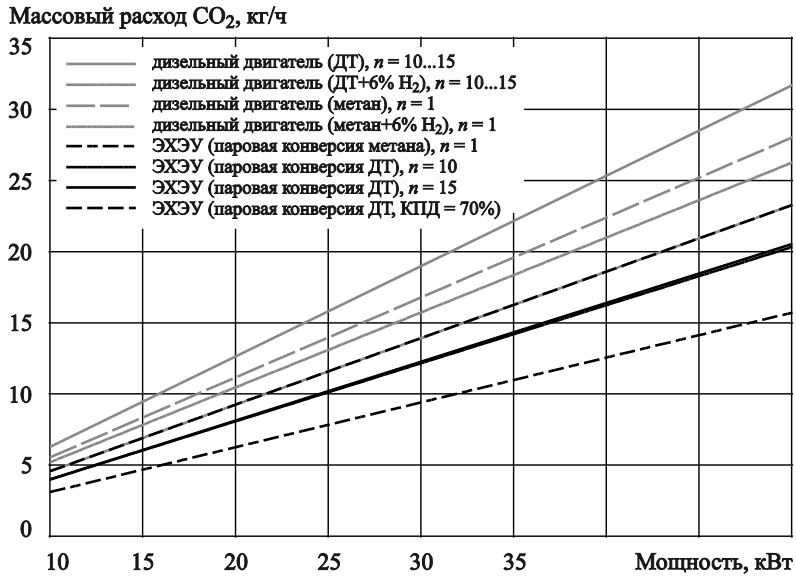


Рис. 2. Зависимость массового расхода диоксида углерода от мощности для дизельного двигателя и электрохимических энергоустановок с учетом углеводородных чисел

Fig. 2. CO_2 mass consumption versus power of diesel engine and fuel cell-based power plant with consideration of hydrocarbon numbers

- расход углеводородного топлива при добавке водорода определяется уравнением [14]:

$$G_{т(H_2)} = G_т - G_{H_2}(q_{H_2} / q_т),$$

где $G_{т(H_2)}$ – расход топлива при добавке водорода, кг/ч; $G_т$, G_{H_2} – расход топлива и расход водорода соответственно, кг/ч; q_{H_2}, $q_т$ – низшие теплотворные способности водорода и дизельного топлива соответственно.
- химическая формула дизельного топлива рассматривалась в диапазоне углеродных чисел n = 10…15;
- удельная теплота сгорания дизельного топлива – 42 МДж/кг;
- КПД ЭХГ – 55 % [15];
- коэффициент избытка водорода – 1,2;
- КПД процесса конверсии углеводородного топлива – 70–80 % [12];
- КПД дизельного двигателя – 40 % [5];
- расход водорода в добавке к углеводородному топливу – 6 % масс. [14].

График изменения массового расхода диоксида углерода для дизельного двигателя и ЭХЭУ в зависимости от мощности представлен на рис. 2.

Как следует из результатов расчета, приведенных на рис. 2, в диапазоне углеродных чисел, соответствующих дизельному топливу, снижение массового расхода диоксида углерода при паровой конверсии дизельного топлива незначительно. Изменение углеродного числа оказывает большее влияние на расход диоксида углерода для ЭХЭУ с паровой конверсией метана в сравнении с дизельным двигателем, использующим метан в качестве топлива. Работа ДД с метаном и добавкой водорода 6 % сопровождается бóльшим расходом диоксида углерода в сравнении с ЭХЭУ с КПД паровой конверсии по нижней границе.

По результатам представленных исследований можно сделать вывод о необходимости учета затрат на генерацию, транспортировку, сжатие и/или ожижение водорода. Хранение водорода в связанном виде в углеводородном топливе упрощает задачу транспортировки. В то же время при реализации процесса конверсии углеводородного топлива на борту в составе ЭХЭУ расход диоксида углерода меньше по отношению к дизельному двигателю. Однако обеспечение данного преимущества ЭХЭУ приводит к необходимости оснащения ее системой генерации водорода, что в свою очередь требует проведения дополнительного анализа.

Список использованной литературы

1. Об утверждении технического регламента о безопасности объектов внутреннего водного транспорта : постановление Правительства РФ от 12.08.2010 № 623 : [по сост. на 17.06.2025] // Правительство России : [сайт]. Москва, 2025. URL: http://government.ru/docs/all/159760/ (дата обращения: 20.03.2026).
2. Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов : Приложение VI (пересмотренное) к Конвенции // Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененная протоколом 1978 г. к ней : МАРПОЛ 73/78 : в 3 кн. Санкт-Петербург : ЦНИИМФ, 2017. Кн. 3. С. 10–183.
3. Резолюция MEPC.328(76). Поправки к приложению к протоколу 1997 года об изменении Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов 1973 года, измененной протоколом 1978 года к ней. Пересмотренное Приложение VI к Конвенции МАРПОЛ 2021 года // Официальный интернет-портал правовой информации : [сайт]. Москва, 2022. URL: http://publication.pravo.gov.ru/file/pdf?eoNumber=0001202212080010 (дата обращения: 20.03.2026).
4. *Каменев В.Ф., Фомин В.М., Хрипач Н.А.* Теоретические и экспериментальные исследования работы двигателя на дизельно-водородных топливных композициях // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2005. № 7(27). С. 32–41.
5. *Безюков О.К., Жуков В.А., Ященко О.И.* Газомоторное топливо на водном транспорте // Вестник Государственного ун-та морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. 2014. № 6(28). С. 31–39.
6. *Балашов М.Л., Евстифеев А.А.* Силовая энергетическая установка с атомарным водородным дизельным двигателем // Транспорт на альтернативном топливе. 2017. № 5(59). С. 41–45.
7. Проблемы аккумулирования и хранения водорода / *В.Н. Фатеев, О.К. Алексеева, С.В. Коробцев* [и др.] // Kimya Problemleri. 2018. Т. 16, № 4. С. 453–483. DOI: 10.32737/2221-8688-2018-4-453-483.
8. *Алексин Е.Н.* Способы хранения и получения водорода на подводной лодке : дис. … канд. техн. наук : 05.08.05 / С.-Петерб. гос. мор. техн. ун-т. Санкт-Петербург, 2013. 204 с.
9. Системы хранения водорода / *О.К. Алексеева, С.И. Козлов, Р.О. Самсонов, В.Н. Фатеев* // Транспорт на альтернативном топливе. 2009. № 4(10). С. 68–75.
10. ГОСТ Р 55891-2013. Водород газообразный и водородные смеси. Бортовые системы хранения топлива для транспортных средств. Москва : Стандартинформ, 2014. IV, 35, [1] с.

11. *Булычев Б.М., Стороженко П.А.* Молекулярные и ионные гидриды металлов как источники водорода для энергетических установок // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2004. № 4(12). С. 5–10.
12. Производство водорода из органического сырья / *С.В. Коробцев, М.Ф. Кротов, В.Н. Фатеев* [и др.] // Транспорт на альтернативном топливе. 2013. № 6(36). С. 10–16.
13. *Коровин Н.В.* Электрохимическая энергетика. Москва : Энергоатомиздат, 1991. 263 с.
14. *Павлов Д.А., Пионтковская С.А., Смоленский В.В.* Особенности применения водорода в ДВС при различных способах формирования топливовоздушных смесей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 4–5. С. 924–930.
15. *Касаткин М.А., Ландграф И.К.* Перспективы водородных энергоустановок на топливных элементах для развития электротранспорта // Транспорт Российской Федерации. 2019. № 6(85). С. 46–49.

References

1. On approval of technical safety regulations for inland waterborne transport facilities. Directive of the Government of the Russian Federation No. 623 dt. August 12, 2010 (as of June 17, 2025) // Web site of the Government of the Russian Federation. Moscow, 2025. URL: http://government.ru/docs/all/159760/ (Accessed: 20.03.2026) (*in Russian*).
2. Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships: Annexure VI (revised) to MARPOL // International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 (MARPOL 73/78). In 3 books. St. Petersburg : TsNIIMF, 2017. Book 3. P. 10–183 (*in Russian*).
3. Resolution MEPC.328(76). Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto. Annexure VI (revised) to MARPOL // Official web portal of legal information : [site]. Moscow, 2022. URL: http://publication.pravo.gov.ru/file/pdf?eoNumber=0001202212080010 (Accessed: 20.03.2026) (*in Russian*).
4. *Kamenev V.F., Fomin V.M., Khripach N.A.* Theoretical and experimental studies of engine operation on diesel-hydrogen fuel mixes // International Scientific Journal Alternative Energy and Ecology (ISJAEE). 2005. No. 7(27). P. 32–41 (*in Russian*).
5. *Bezyukov O.K., Zhukov V.A., Yashenko O.I.* Gas fuel for waterborne transport // Bulletin of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. 2014. No. 6(28). P. 31–39 (*in Russian*).
6. *Balashov M.L., Yevstifeev A.A.* Propulsion machinery with atomic hydrogen diesel engine // Alternative Fuel Transport. 2017. No. 5(59). P. 41–45 (*in Russian*).
7. Challenges in hydrogen accumulation and storage / *V.N. Fateev, O.K. Alekseeva, S.V. Korobtsev* [et al.] // Chemical Problems. 2018. Vol. 16, No. 4. P. 453–483. DOI: 10.32737/2221-8688-2018-4-453-483 (*in Russian*).
8. *Aleksin Ye.N.* Methods for hydrogen production and storage aboard submarine : Cand. Sci. Theses : 05.08.05. St. Petersburg State Marine Technical University. 2013. 204 p. (*in Russian*).
9. Hydrogen storage systems / *O.K. Alekseeva, S.I. Kozlov, R.O. Samsonov, V.N. Fateev* // Alternative Fuel Transport. 2009. No. 4(10). P. 68–75 (*in Russian*).
10. GOST R 55891-2013. Gaseous hydrogen and hydrogen blends. Fuel storage systems for land vehicles. Moscow : Standartinform, 2014. IV, 35 [1] p. (*in Russian*).
11. *Bulychev B.M., Storozhenko P.A.* Molecular and ionic metal hydrides as sources of hydrogen for power plants // International Scientific Journal Alternative Energy and Ecology (ISJAEE). 2004. No. 4(12). P. 5–10 (*in Russian*).
12. Hydrogen production from organic materials / *S.V. Korobtsev, M.F. Krotov, V.N. Fateev* [et al.] // Alternative Fuel Transport. 2013. No. 6(36). P. 10–16 (*in Russian*).
13. *Korovin N.V.* Electrochemical power systems. Moscow : Energoatomizdat, 1991. 263 p. (*in Russian*).
14. *Pavlov D.A., Piontkovskaya S.A., Smolensky V.V.* Peculiarities of hydrogen application in internal combustion engines for different methods of fuel-air blending // Transactions of Samara Research Centre of Russian Academy of Sciences. 2016. Vol. 18, No. 4–5. P. 924–930 (*in Russian*).
15. *Kasatkin M.A., Landrgaf I.K.* Prospects of fuel cell-based hydrogen power plants // Transport in Russian Federation. 2019. No. 6(85). P. 46–49 (*in Russian*).

Сведения об авторах

Алексин Евгений Николаевич, к.т.н., доцент кафедры перспективных источников энергии и систем энергообеспечения ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3. E-mail: aleksin@smtu.ru.

Глазырина Диана Олеговна, к.т.н., доцент кафедры перспективных источников энергии и систем энергообеспечения ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3. E-mail: d_glazyrina@bk.ru.

Ландграф Игорь Казимирович, директор инжинирингового центра «Водородная энергетика» ООО «Центр водородной

энергетики», старший преподаватель кафедры перспективных источников энергии и систем энергообеспечения ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3. E-mail: i_landgraf@mail.ru.

Маловик Дмитрий Сергеевич, к.т.н., младший научный сотрудник ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова». Адрес: 197342, Россия, Санкт-Петербург, Ушаковская наб., д. 17/1. Тел.: +7 (812) 405-07-35. E-mail: dimamalovik@gmail.com.

About the authors

Evgeny N. Aleksin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. E-mail: aleksin@smtu.ru.

Diana O. Glazyrina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. E-mail: d_glazyrina@bk.ru.

Igor K. Landgraf, Director of Hydrogen Energy Center LLC, Senior lecturer of St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. E-mail: i_landgraf@mail.ru.

Dmitry S. Malovik, Cand. Sci. (Eng.), Junior Researcher, Kuznetsov Naval Academy. Address: 17/1, Ushakovskaya nab., St. Petersburg, Russia, post code 197342. Tel.: +7 (812) 405-07-35. E-mail: dimamalovik@gmail.com.

Поступила / Received: 12.03.26
Принята в печать / Accepted: 12.05.26
© Коллектив авторов, 2026