

Литература

1. MEPC 75/7/15 — Fourth IMO GHG Study 2020, International Maritime Organization (IMO), London, UK, July 2020.
2. Елихин А.И. Управление токсичностью выхлопов судовых двигателей / А.И. Елихин, Ю.Г. Косолап // Эксплуатация морского транспорта.— 2020.— № 2 (95).— С. 66-69.
3. Шурпяк В.К., Толмачев С.А., Мусонов М.В. Новые требования ИМО по уменьшению выбросов углекислого газа с морских судов, совершающих транспортную работу // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства.— 2021.— № 64/65.— С. 4-18
4. Модина М.А. Ways to reduce harmful emissions from the operation of power plants in special environmental control areas/Modina M.A., Kheckert E.V., Epikhin A.I., Voskanyan A.A., Pismenskaya Yu.V., Shkoda V.V.// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021 International Symposium "Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects, ESHCIP 2021". IOP Publishing Ltd, 2021. С. 012104. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/867/1/012104>
5. Туркин В.А. Снижение выбросов вредных веществ судовыми дизельными двигателями настройкой регулируемых параметров / В.А. Туркин, А.Ю. Самойленко, Р.Ю. Атласов, Г.В. Игнатенко // Морские интеллектуальные технологии.— 2019.— № 4 (46).— Т.3. С. 59-66.
6. <https://www.irclass.org/media/1393/energy-efficiency-design-index.pdf>
7. "Ship Energy Efficiency Measures, Status and Guidance", <http://ww2.eagle.org/>
8. <https://www.becker-marine-systems.com/products/energy-saving-devices.html> <https://www.sciencedirect.com/book/9780750669443/marine-rudders-and-control-surfaces>
9. K. Mizzi et al. Design optimisation of Propeller Boss Cap Fins for enhanced propeller performance/ Applied Ocean Research 62 (2017) 210–222
10. <https://www.jmuc.co.jp/en/rd/development/hydrodynamics/energy-saving/>

References

1. MEPC 75/7/15 — Fourth IMO GHG Study 2020, International Maritime Organization (IMO), London, UK, July 2020.
2. Epihin A.I. Upravlenie toksichnost'yu vykhlopov sudovyh dvigatelej /Epihin A.I., Kosolap YUG.// Eksplyuatsiya morskogo transporta. 2020. № 2 (95). S. 66-69.
3. SHurpyak V.K., Tolmachev S.A., Musonov M.V. Novye trebovaniya IMO po umen'sheniyu vybrosov uglekislogo gaza s morskikh sudov, sovershayushchih transportnuyu rabotu Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudoходства, № 64/65, 2021 – S. 4-18
4. Modina M.A. Ways to reduce harmful emissions from the operation of power plants in special environmental control areas/Modina M.A., Kheckert E.V., Epikhin A.I., Voskanyan A.A., Pismenskaya Yu.V., Shkoda V.V.// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021 International Symposium "Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects, ESHCIP 2021". IOP Publishing Ltd, 2021. S. 012104. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/867/1/012104>
5. Turkin V.A. Snizhenie vybrosov vrednyh veshchestv sudovymi dizel'nymi dvigatelyami nastrojkoj reguliruemyh parametrov / V.A. Turkin, A.YU. Samojlenko, R.YU. Atlasov, G.V. Ignatenko // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 4 (46). T.3. S. 59-66.
6. <https://www.irclass.org/media/1393/energy-efficiency-design-index.pdf>
7. "Ship Energy Efficiency Measures, Status and Guidance", <http://ww2.eagle.org/>
8. <https://www.becker-marine-systems.com/products/energy-saving-devices.html><https://www.sciencedirect.com/book/9780750669443/marine-rudders-and-control-surfaces>
9. K. Mizzi et al. Design optimisation of Propeller Boss Cap Fins for enhanced propeller performance/ Applied Ocean Research 62 (2017) 210–222
10. <https://www.jmuc.co.jp/en/rd/development/hydrodynamics/energy-saving/>

УДК 621

DOI: 10.34046/aumsuomt105/24

КОМПЛЕКСНОЕ РЕШЕНИЕ, ВКЛЮЧАЮЩЕЕ В СЕБЯ СИСТЕМУ ПО ВЫДЕЛЕНИЮ, СЖИЖЕНИЮ И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ВОДОРОДА НА СУДАХ МОРСКОГО ФЛОТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧНОСТИ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Т.Г. Тория, старший преподаватель

А.И. Елихин, кандидат технических наук, доцент

С.И. Кондратьев, доктор технических наук, профессор

М.А. Модина, кандидат технических наук, доцент

Статья раскрывает потенциал и экологическую важность применения сжиженного водорода на судах гражданского флота в качестве топлива. Рассмотрены текущие требования к содержанию опасных веществ в отработанных газах, характеристики среднестатистического энергетического комплекса судна

гражданского флота. Произведен расчет необходимого количества сжиженного водорода для обеспечения определенной мощности, способной питать ряд судовых потребителей. Произведен расчет количества сжиженного водорода, который можно получить при использовании секционного фильтра с графеновой мембраной и криогенератора. Сделан вывод о высокой эффективности водородных аккумуляторных батарей, получающих водород из отработанных газов судовой энергетической установки.

Ключевые слова: судоходство, пропульсивный комплекс, судовая энергетическая установка, водород, экология

A COMPLETE SOLUTION THAT INCLUDES A SYSTEM ON THE ISOLATION, LIQUEFACTION AND USE OF HYDROGEN ON MARINE VESSELS TO IMPROVE ENVIRONMENTAL FRIENDLINESS MARINE POWER PLANT

T.G. Toria, A.I. Epikhin, S.I. Kondratyev, M.A. Modina

The article reveals the potential and ecological importance of using liquefied hydrogen on civil fleet vessels as fuel. The current requirements for the content of hazardous substances in exhaust gases, characteristics of the average energy complex of a civil fleet vessel are considered. The calculation of the required amount of liquefied hydrogen to provide a certain power capable of powering a number of ship consumers has been made. The calculation of the amount of liquefied hydrogen that can be obtained by using a sectional filter with a graphene membrane and a cryogenerator has been made. The conclusion is made about the high efficiency of hydrogen storage batteries that receive hydrogen from the exhaust gases of a ship's power plant.

Keywords: shipping, propulsion system, marine power plant, hydrogen, ecology

Введение (Introduction)

На протяжении последних ста лет исследователи и инженеры успешно разрешали множество самых различных задач и проблем, относящихся к широкому спектру сфер и отраслей. Как пример, чуть больше ста лет назад, двигатели внутреннего сгорания имели КПД, не превышающий 15%, однако, в наши дни ряд типов ДВС превысили значение более 50% [1]. Подобный прирост эффективного использования узлов, конструктивных решений и топлив, несомненно, и создал благоприятные условия для экономического и в целом мирового развития человеческого сообщества. Стоит заметить, что подобный прогресс имел не только положительные черты, но и отрицательные, к которым, в свою очередь, можно отнести ряд экологических проблем. Ряд международных организаций ввели ограничения на выбросы оксидов азота и серы в отработанных газах пропульсивных комплексов судов гражданского флота [2, 8, 9], но по-прежнему имеет высокую актуальность проблема выбросов оксидов углерода (сажа, углекислый газ). Разрабатываются различные конструктивные решения и способы

очистки отработанных газов, их регенерация, применяются новые виды топлив, стремящихся приблизиться к экологически чистым. Среди них может быть отмечен сжиженный водород.

Материалы и методы (Materials and methods)

Отработанные газы главных и вспомогательных судовых двигателей внутреннего сгорания содержат более 20 компонентов [3, 8, 9, 10], некоторые из них представляют большую опасность, чем другие, потому их содержание тщательно анализируется и контролируется в соответствии с рядом международных документов и конвенций. Некоторые из упомянутых компонентов представлены в таблице 1. В целях повышения экологичности работы судовых механизмов и систем представляется возможным их питание от водородных аккумуляторов. В целях доказательства эффективности их работы будет произведен расчет количества водорода в отработанных газах, предполагаемое количество получаемого сжиженного водорода и продолжительность работы судовых механизмов и систем в зависимости от ранее упомянутых значений.

Таблица 1 – Характеристики токсичных компонентов отработанных газов [3]

Элемент	Концентрация, г/м ³	Удельные выбросы, г/(кВт*ч)
Оксиды азота, NO _x	1,6-8,1	9-31
Оксиды углерода, CO	0,25-2,55	0,5-6,0
Углеводороды, CH _x	0,2-2,1	0,3-2,5
Оксиды серы, SO _x	0,12-0,6	0,42-1,6
Альдегиды, RCHO	0,001-0,05	0,06-0,21
Сажа, C	0,06-0,6	0,3-0,55

Использование сжиженного водорода на судах гражданского флота представляется наиболее эффективным и удобным при возможности

его получения и сжижения непосредственно на борту.

Это может стать возможным благодаря материалу, именуемому «графен» [4] и представляющему собой однослойный полимер из атомов углерода, имеющим естественные дефекты, получаемые при травлении азотом, способные пропускать сквозь себя атомы водорода (H₂), задерживая молекулы других газов и твердые частицы.

Таким образом, применение секционного фильтра [5] с использованием в качестве одной из ступеней очистки графеновой мембраны, позволит выделить из отработанных двигателем внутреннего сгорания газов молекул водорода для их последующего сжижения одним из возможных криогенераторов.

Так же для работы электродвигателя на сжиженном водороде необходимо наличие кислорода, для получения которого может использоваться дополнительный воздухозаборник или же использование сжатого воздуха высокого давления с последующим дросселированием до необходимых значений. Иное решение включает в себя использование запаса сжиженного кислорода.

Исходя из данных, можно предположить о количестве общей совокупности веществ, выбираемых в составе отработанных газов, с средне-статистического судна, обладающего усредненными характеристиками. Исходные данные представлены в таблице 2.

Используя данные таблицы 2 и делая допущение, что порядка 10% состава отработанных газов приходится на углекислый газ [6], можно предположить, что всего в сутки с судна выбирается 1893,44 тонн газов.

Исходя из плотности выхлопных газов, принятой за 0,94 кг/м³ и избыточном давлении равном 13,33 Па, можно рассчитать объем, занимаемый ими.

$m/p=V$, где m – масса газов, p - плотность газов, V – искомый объем газов.

Таблица 3 – Расчет количества сжиженного водорода для питания электроэнергией судовых потребителей

Судовые потребители электроэнергии, кВт*ч	900
Эффективность водородного элемента (КПД), %	60
Аналог 1 кВт*ч электрической энергии - химической, кВт*ч	1,666
Коэффициент перевода кВт*ч в Джоули, МДж	3,6
Молекулярная масса водорода	2
Энергия 1 кг водорода, МДж	141,8
Необходимое количество водорода, гр.	42,3
Количество водорода в 22,4 литрах при н.у., гр.	2
Необходимое количество водорода при н.у. для выработки 1 кВт*ч, м ³	0,47375
Плотность водорода (газ), кг/м ³	0,0899
Плотность сжиженного водорода (-253 °С), кг/м ³	7,08
Количество водорода, необходимое, для получения 1 литра сжиженного, м ³	0,787541713
Количество сжиженного водорода, необходимого на выработку 1 кВт*ч, м ³	0,000602
Необходимое количество сжиженного водорода для питания судовых потребителей (900 кВт) в течение 1 часа, м ³	0,5418
Необходимое количество сжиженного водорода для питания судовых потребителей в течение суток, м ³	~13

$$1893440 \text{ кг} : 0,94 \text{ кг/м}^3 = 20205787,2 \text{ м}^3.$$

Таблица 2 – Характеристики главных и вспомогательных двигателей теоретического судна

Расчетные данные	«MAN B&W» 6S60MC-C	«Caterpillar 3412C»
Количество двигателей	1	3
Удельный расход топлива g, грамм/кВт*час	175	216
Мощность двигателя P, кВт	14280	900
Загрузка судна в отношении от всего водоизмещения	0,8	
Режим работы двигателя		0,8
Время работы t, час		24 часа
Расход топлива на одном судне H, тонны	47,98	11,19
Переводной коэффициент	3,206 – для дизельного топлива (ИСО 8217 сорта DMX – DMВ)	
Количество выбросов CO ₂ в день, тонны		189,344

В целях узнать количество водорода, который можно выделить из данного объема газов, необходимо узнать концентрацию водородосодержащих веществ, к которым могут быть отнесены: пары воды, альдегиды, углеводороды и ряд других, однако, наибольшее количество водорода можно выделить именно из водяных паров, потому расчет будет опираться именно значение содержания водяных паров в отработанных газах.

Это представляется возможным сделать двумя способами: рассчитав данные значения через полученным объем отработанных газов или же используя характеристики главных и вспомогательных двигателей.

В целях доказательства эффективности работы судовых систем и механизмов от водородных аккумуляторных батарей, представляется возможным сделать расчет их работы, способной обеспечить судовых потребителей на 900 кВт*ч.

Располагая данными о количестве необходимого водорода (в частности – сжиженного водорода), в целях доказательства эффективности реализации подобной системы питания, необходимо произвести расчет, доказывающий возможность получения сжиженного водорода в указанных количествах.

Необходимо сделать допущение, что результат может быть значительно выше при возможности использования других видов топлив, содержащих в отработанных газах значительно более высокое количество водородосодержащих соединений.

Таблица 4 – Расчет количества сжиженного водорода, получаемого из ОГ

	Водяные пары (H ₂ O)
Содержание в ОГ, %	5,1
Содержание в ОГ, м ³	1030495,15
Плотность, кг/м ³	0,00485
Масса, кг	4997,9
Количество молей вещества, (m/M), n	277660,96
Объем водорода после фильтра, м ³ (n*V _m)	6219,6
Объем водорода, получаемый в час, м ³	258,825
Итого получено сжиженного водорода за сутки, м ³	7,8876
Соотношение полученного количества сжиженного водорода за сутки с необходимым	7,8876 \ 13 = 0,6067

Пользуясь формулой теплоты, которую водороду необходимо передать для достижения температуры кипения, возможно получить хладопроизводительность установки для ее сжижения с учетом того, что после выхода и фильтрации отработанные газы были предварительно охлаждены до температуры 75 градусов по Цельсию.

$$Q=C*(T_H-T_K)*m, \text{ где}$$

Q – количество теплоты, C – удельная теплоемкость, T_H – начальная температура, T_K – конечная температура (температура кипения водорода), m – масса газа.

$Q=14,220*(75+253)*559=2592502,25=720,139$ кВт – количество теплоты, необходимое передать водороду криогенератору.

Криогенераторы, способные охладить водород до необходимых температур, могут быть гелиевыми [7] или Гиффорда-МакМахона. Работа двух-трех подобных установок будет потреблять от 15 до 150 кВт энергии в зависимости от их данных, настройки и ТТХ.

Результаты (Results)

В целях доказательства повышения экологичности работы судовых систем и механизмов,

может быть произведен расчет эффективности использования водородной аккумуляторной батареи, представленный в таблице 5.

Таблица 5 – Расчет эффективности использования водородной аккумуляторной батареи

Суммарная мощность судовых главных и вспомогательных двигателей при их эксплуатации на 80% мощности, кВт	13584
Мощность потребителей, способных обеспечить водородная аккумуляторная батарея, кВт	400-531
Мощность, заменяемая водородной аккумуляторной батареей, %	4

Помимо повышения эффективности работы, использование водородной аккумуляторной батареи так же включает на одном из своих этапов использование секционного комплексного фильтра, в составе которого находится графеновая мембрана, что делает работу судовых главных и вспомогательных двигателей экологически чище на 89% и выше [5, 8].

Описанная система может включать в себя теплообменник для понижения температуры отработанных газов до комплексного фильтра, комплексный фильтр, включающий графеновую мембрану, теплообменник, понижающий температуру водородного газа перед поступлением в криогенератор, криогенератор, систему арматур и трубопроводов для хранения сжиженного водорода, емкости для хранения сжиженного водорода, систему арматур для распределения и потребления водородными аккумуляторными батареями сжиженного водорода, водородные аккумуляторные батареи, подключенные к ГРЩ и позволяющие поставлять электроэнергию через судовые электрические сети.

Выводы (Conclusions)

Подобное техническое решение потребует установки дополнительного оборудования на судах, однако, позволит значительно увеличить общую мощность судовой энергетической установки, повысить экологичность ее работы.

Комплексное решение, включающее в себя систему по выделению, сжижению и использованию водорода на судах гражданского флота позволит стать переходным звеном в ведущей борьбе с загрязнением атмосферы вредными веществами и являться предвестником наступления времен, когда все человеческое сообщество станет использовать лишь экологически чистые топлива – что относится и к их потреблению, и к добыче.

Литература

1. Возницкий И.В. Судовые двигатели внутреннего сгорания (конструкция, теория эксплуатации). - М Транспорт, 1990. - 360 с.
2. The International Maritime Organization. Sulphur 2020 – cutting sulphur oxide emissions, available at: <http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>.
3. Епихин, А. И. Концепция экологического совершенствования судовых энергетических установок / А. И. Епихин, М. А. Модина, Е. В. Хекерт // Эксплуатация морского транспорта. – 2020. – № 3(96). – С. 127-132. – DOI 10.34046/aumsuomt96/18. – EDN PULYAE.
4. Huang S, Dakhchoune M, Luo W, Oveisi E, He G, Rezaei M, Zhao J, Alexander DTL, Züttel A, Strano MS, Agrawal KV. Single-layer graphene membranes by crack-free transfer for gas mixture separation. *Nat Commun.* 2018 Jul 6;9(1):2632. doi: 10.1038/s41467-018-04904-3. PMID: 29980683; PMCID: PMC6035196.
5. Туркин, А. В. Экспериментальное исследование эффективности многосекционного комплексного устройства очистки выхлопных газов судового двигателя / А. В. Туркин, В. А. Туркин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2015. – № 4. – С. 79-85. – EDN VATWWF.
6. Зырянов, В. Ю. Содержание выхлопных газов. Анализ бензина при сгорании / В. Ю. Зырянов // Молодой ученый. – 2020. – № 19(309). – С. 25-28. – EDN ULQCMW.
7. M. Klaus, Ch. Haberstroh, H. Quack, Y. Beßler, and M. Butzek. "Conceptual Design of the Liquid Hydrogen Moderator Cooling Circuit for the European Spallation Source" *Physics Procedia*, vol. 67, 2015. doi:10.1016/j.phpro.2015.06.026
8. Ways to reduce harmful emissions from the operation of power plants in special environmental control areas / M. A. Modina, E. V. Kheckert, A. I. Epikhin [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 2021 International Symposium "Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects, ESHCIP 2021", Moscow, 10 марта 2021 года. – IOP Publishing Ltd: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 012104. – DOI 10.1088/1755-1315/867/1/012104. – EDN MBNNNX.
9. Состояние проблемы и методы снижения вредных выбросов судовых энергетических установок / Т. А. Макаревич, Е. В. Хекерт, Ю. С. Кузнецова [и др.] // Эксплуатация морского транспорта. – 2022. – № 2(103). – С. 127-134. – DOI 10.34046/aumsuomt103/27. – EDN XABIKE.

References

1. 1. Voznitsky I.V. Marine internal combustion engines (design, theory of operation). - Moscow Transport, 1990. - 360 p.
2. The International Maritime Organization. Sulphur 2020 – cutting sulphur oxide emissions, available at: <http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>.
3. Epikhin, A. I. The concept of ecological improvement of ship power plants / A. I. Epikhin, M. A. Modina, E. V. Heckert // Operation of sea transport. – 2020. – № 3(96). – PP. 127-132. – DOI 10.34046/aumsuomt96/18. – EDN PULYAE.
4. Huang S, Dakhchoune M, Luo W, Oveisi E, He G, Rezaei M, Zhao J, Alexander DTL, Züttel A, Strano MS, Agrawal KV. Single-layer graphene membranes by crack-free transfer for gas mixture separation. *Nat Commun.* 2018 Jul 6;9(1):2632. doi: 10.1038/s41467-018-04904-3. PMID: 29980683; PMCID: PMC6035196.
5. Turkin, A.V. Experimental study of the effectiveness of a multi-section complex device for cleaning exhaust gases of a marine engine / A.V. Turkin, V. A. Turkin // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology. - 2015. – No. 4. – PP. 79-85. – EDN VATWWF.
6. Zyryanov, V. Yu. The content of exhaust gases. Analysis of gasoline during combustion / V. Y. Zyryanov // Young scientist. – 2020. – № 19(309). – Pp. 25-28. – EDN ULQCMW.
7. M. Klaus, Ch. Haberstroh, H. Quack, Y. Beßler, and M. Butzek. "Conceptual Design of the Liquid Hydrogen Moderator Cooling Circuit for the European Spallation Source" *Physics Procedia*, vol. 67, 2015. doi:10.1016/j.phpro.2015.06.026
8. Ways to reduce harmful emissions from the operation of power plants in special environmental control areas / M. A. Modina, E. V. Kheckert, A. I. Epikhin [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 2021 International Symposium "Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects, ESHCIP 2021", Moscow, March 10, 2021. – IOP Publishing Ltd: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 012104. – DOI 10.1088/1755-1315/867/1/012104. – EDN MBNNNX.
9. The state of the problem and methods of reducing harmful emissions of marine power plants / T. A. Makarevich, E. V. Heckert, Yu. S. Kuznetsova [et al.] // Operation of marine transport. – 2022. – № 2(103). – Pp. 127-134. – DOI 10.34046/aumsuomt103/27. – EDN XABIKE.