

Научная статья  
УДК 629.54  
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-1/74-88>

## Сравнительный анализ альтернативных способов обеспечения соответствия экологическим нормам выбросов выхлопных газов судов (часть 2)

Геннадий Фёдорович Демешко<sup>1</sup>, Владислав Михайлович Кашаев<sup>2</sup>, ✉

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация,

✉ [kashaev.vm@dvfu.ru](mailto:kashaev.vm@dvfu.ru)

**Аннотация.** Принятые Международной морской организацией в 2020 г. требования, изложенные в Приложении VI к конвенции МАРПОЛ 73/78 и касающиеся ограничения содержания оксидов серы и азота в выхлопных газах судов, привели к росту издержек в мировом судоходстве. Эти издержки связаны, в первую очередь, с возникшей необходимостью перехода на дорогостоящее низкосернистое топливо при полном исключении использования традиционного мазута, и хотя оборудование судна средством очистки выхлопных газов (т.н. скруббером) позволяет продолжить использование высокосернистого топлива, это также связано с издержками, возникающими из-за значительных эксплуатационных затрат на установку и эксплуатацию скруббера.

В то же время соответствия экологическим нормам можно достичь, используя на судне в качестве действительно «чистого» топлива его нетрадиционные виды, к каковым, среди прочих, относится природный газ, который в целях достижения максимальной эффективности хранения, транспортировки и использования сжижают на специальном оборудовании, охлаждая до температуры  $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Ниже освещены проектные аспекты реализации на судах указанных выше способов достижения соответствия экологическим нормам и произведено их стоимостное сравнение на примере паромов проекта CNF19M.

В своей предыдущей работе [1], продолжением и дополнением которой является предлагаемая статья, авторы подобное сравнение уже проделали на примере строящихся на заводе «Звезда» танкеров класса «Афрамакс», но посчитали необходимым осветить ряд дополнительных аспектов в использовании рассмотренных авторами способов решения данной проблемы, что и стало предметом предлагаемой публикации.

**Ключевые слова:** экологические требования, ограничение выбросов серы, низкосернистый мазут, сжиженный природный газ в качестве топлива, газомоторные суда, скрубберы, очистка выхлопных газов, экономическая эффективность, экономия на топливе, паромы

**Для цитирования:** Демешко Г.Ф., Кашаев В.М. Сравнительный анализ альтернативных способов обеспечения соответствия экологическим нормам выбросов выхлопных газов судов (часть 2) // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 1(62). С. 74–88.

Original article

## Comparative analysis of alternative ways to ensure compliance with environmental standards for marine exhaust emissions (part 2)

Aleksandr A. Baranov<sup>1</sup>, Aleksandr O. Shanin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

✉ [kashaev.vm@dvfu.ru](mailto:kashaev.vm@dvfu.ru)

© Демешко Г.Ф., Кашаев В.М., 2025

**Abstract.** The requirements adopted by the International Maritime Organization in 2020 and set out in annex VI to the MARPOL 73/78 Convention concerning the limitation of sulfur and nitrogen oxides in ship exhaust gases have led to an increase in international transportation costs. These costs are primarily related to the need to switch to expensive low-sulfur fuels while completely eliminating the use of traditional fuel oil, and although marine exhaust gas purification equipment (the so-called scrubber) allows you to continue using high-sulfur fuels, this is also associated with significant costs for installing and operating a scrubber.

At the same time, compliance with environmental standards can be achieved through the use of non-traditional fuels on board as a truly "clean" fuel, which, among other things, includes natural gas, which, in order to achieve maximum efficiency of storage, transportation and use, is liquefied on special equipment, cooled to a temperature of  $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The constructive aspects of implementing the above-mentioned methods to achieve compliance with environmental standards on ships are highlighted below, and their cost is compared using the example of CNF19M ferries.

In their previous work [1], the continuation and addition of which is the proposed article, the authors have already made a similar comparison using the example of Aframax class tankers under construction at the Zvezda shipbuilding complex, but found it necessary to highlight a number of additional aspects in using methods, which became the object of the proposed publication.

**Keywords:** environmental requirements, sulfur emission control, low sulfur fuel oil, liquefied natural gas as fuel, gas-powered vessels, scrubbers, exhaust gas purification, economic efficiency, fuel economy, ferries

**For citation:** Demeshko G.F., Kashaev V.M. Comparative analysis of alternative ways to ensure compliance with environmental standards for marine exhaust emissions (Part 2). *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 1(62), pp. 74–88. (In Russ.).

## Введение

Сокращение вредных выбросов в атмосферу с выхлопными газами судов для ИМО стало приоритетным и, главное, для судовладельцев безальтернативным, хотя и растянутым во времени с доведением ступенчато до нулевых значений к 2050 году. Это, пожалуй, одно из самых дорогих с т.з. затрат на реализацию требований кампании ИМО (ИМО) из имевших место в последние десятилетия. Уже действующие нормы привели к исключению дальнейшего использования дешёвого высокосернистого мазута как основного до этого вида судового топлива, что значительно увеличивает затраты судовладельцев, вынужденных переходить на низко- и ультранизкосернистый мазут (VLSFO и ULSFO соответственно), т.е. то же топливо, но прошедшее весьма дорогостоящую очистку от источников вредных оксидов в газовыхлопе двигателя.

Основным нормативным документом, устанавливающим такие ограничения, является, в первую очередь, Приложение VI к Конвенции ИМО (International Maritime Organization) МАРПОЛ 73/78, которое ограничивает допустимые концентрации оксидов серы и азота –  $\text{SO}_x$  и  $\text{NO}_x$ . Особые трудности возникают при реализации требований по содержанию серы ( $\text{SO}_x$ ).

В Приложении VI к МАРПОЛ также указаны зоны особого контроля выбросов, в которых разрешается использовать только наиболее дорогостоящий среди прочих мазут ULSFO с содержанием серы не более 0,1 %. Список таких зон регулярно пополняется, поскольку, согласно конвенции, любая страна вправе вводить ограничения по содержанию серы в топливе в пределах своих акваторий. В число стран, где разрешён к использованию только мазут ULSFO, входят Китай, Южная Корея, Исландия, Норвегия, Ирландия, Турция, страны ЕС (см. рис. 1). Австралия также ограничивает содержание серы в топливе для пассажирских судов в порту Сидней. Стоит вопрос о дальнейшем ужесточении этих требований со снижением содержания серы в выхлопных газах до 0,1 % повсеместно.

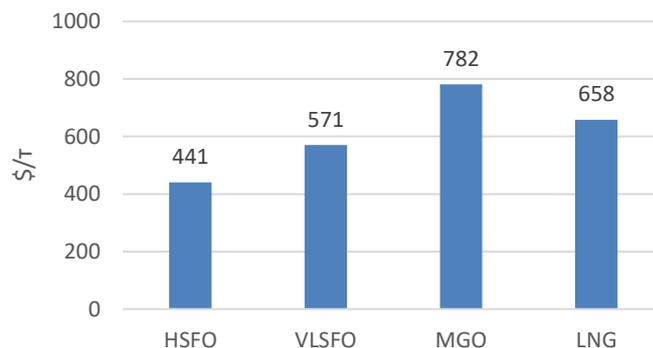
В наши дни в районах мирового океана, не относящихся к зонам особого контроля выбросов, разрешается использовать топливо с содержанием серы не более 0,5 %, т.е. не только ULSFO, но и менее дорогой по сравнению с ним VLSFO (рис. 2). Необходимо отметить, что в качестве альтернативы мазуту ULSFO на рынке топлива представлен такой продукт перегонки нефти, как морской газойль (Marine gas oil – MGO), однако его стоимость всё так же высока по сравнению с традиционным мазутом (HSFO – High sulfur fuel oil или HFO – Heavy fuel oil, далее – HSFO). Таким образом, использование любого вида низкосернистого топлива сопря-

жено со значительными издержками ввиду более высокой стоимости относительно традиционного высокосернистого мазута (от 30 %).



**Рис. 1. Зоны контроля выбросов серы: синим цветом обозначены зоны особого контроля выбросов серы SECA (SECA – SOx emission control areas) согласно [2], зелёным и голубым – зоны контроля выбросов, установленные морскими администрациями стран в дополнение к определённым в [2] (см. [26])**

Fig. 1. SOx emission control areas (SECA): the blue colour indicates the SECA according to [2]; the green and light blue colours indicate SECA established by maritime administrations of various countries in addition to [2] (see [26])



**Рис. 2. Цены на топливо с различным содержанием серы в порту Усть-Луга на 13.10.2024 по данным [3] и СПГ по данным [4]**

Fig. 2. Bunker prices of fuels with various sulfur contents in Ust-Luga Port as of 13.10.2024 according to [3] and LNG according to [4]

Оснащение судна скруббером допускает использование дешёвого традиционного топлива, но это при высокой стоимости самого скруббера, дополнительных затратах на его эксплуатацию и немалых массогабаритных характеристиках такого оборудования при его размещении на судне.

Одним из наиболее перспективных способов снижения затрат на топливо признаётся постройка судов, использующих в качестве «чистого» топлива сжиженный природный газ (СПГ), который привлекателен тем, что его производство и использование во всём мире в полной мере освоены и обеспечены технологически. Использование же водорода, метанола, аммиака сегодня экологически привлекательно, но требует обширных затрат и по времени, и по инвестициям, что касается и работающих на таком топливе двигателей, и особенно обеспечения безопасности в обращении с этими продуктами. Массовое их применение, по-видимому, станет результатом полной реализации рассматриваемой программы ИМО по экологическим ограничениям, которая планируется к 2050 г.

Обращаясь к варианту достижения соответствия по нормам вредных выбросов применением СПГ в качестве топлива, следует отметить, что в предыдущей статье [1] авторами уже были приведены его характеристики, проектные аспекты его использования на судах, описаны основные особенности газопоршневых двигателей; особое внимание уделено особенностям танков СПГ типа С как наиболее подходящих для хранения СПГ на газомоторных судах, особенно с т.з. обеспечения безопасности.

В статье также описаны нормативная база и проектные особенности очистки выхлопных газов судов при помощи скрубберов, по которым дано сопоставление их конструктивных типов.

Свойства сжиженного природного газа (и как топлива, и как объекта его получения, хранения и транспортировки и в нашей стране, и за рубежом) изучены в достаточной мере [5, 6, 7]. Этому способствовали также:

- разработка методологии проектирования судов-бункеровщиков СПГ [8],
- изучение последствий аварий на судах-газовозах [9],
- разработка технических решений и нормативных требований по переводу ДВС на использование ими природного газа в качестве топлива [10],
- исследования экологической эффективности газопоршневых двигателей [11].

На сегодня уже сформирована база нормативной документации по проектированию, строительству и эксплуатации ГМС. Основными руководящими документами являются: IGF Code8, Правила и руководства МАКО9, а также Руководства неправительственных организаций SGMF10 и SIGTTO11. В настоящее время основой отечественной нормативной базы в области ГМС являются Правила РМРС [12] и государственные стандарты, такие как ГОСТ Р ИСО 28460-2018, ГОСТ Р 59020-2020 и др. Продолжается разработка серии отечественных стандартов, нормирующей весь жизненный цикл ГМС.

В составе отечественного морского транспортного флота уже имеются газомоторные суда (ГМС), представленные танкерами класса «Афрамакс» пр. 114К, танкерами проекта MR-50, паромы пр. CNF19M и др. Специалистами Морского инженерного бюро (МИБ) изучается возможность переоснащения судов проектов RSD44, RSD59, RST27 в суда газомоторные [13]. С 2022 г. в Балтийском море функционирует отечественный СПГ-бункеровщик «Дмитрий Менделеев», что на новый уровень подняло СПГ-инфраструктуру в данном регионе РФ.

Проведя сравнительное исследование способов достижения соответствия введённым экологическим нормам на примере строящихся в РФ танкеров класса «Афрамакс» проекта 114К в разной комплектации, авторы [1] сочли ряд аспектов проблемы недостаточно освещёнными и нашли возможным сделать ряд дополнений к содержанию указанного исследования, опираясь на результаты аналогичного сравнения, но уже произведённого на примере судов другого типа и назначения, в качестве которых выбраны недавно введённые в эксплуатацию газомоторные суда – паромы проекта CNF19M, разработанного Морским инженерным бюро.

### **Описание особенностей двухтопливных (газомоторных) паромов проекта CNF19M**

Строительство паромов проекта CNF19M «Маршал Рокоссовский» и «Генерал Черняховский» началось в 2018–2019 г. совместно с ООО «Невский ССЗ» и верфью «Kuzey Star Shipyard» (Турция). Заказчиком данных железнодорожно-автомобильных паромов выступил ФГУП «Росморпорт», и в настоящее время в условиях ограниченности грузовых перевозок

<sup>8</sup> IMO. International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels – 2020 г.

<sup>9</sup> Такие как Руководство к энергетическим установкам для судов на газомоторном топливе (ред. 2014 г.), Руководство для судов, переходящих на СПГ (ред. 2017), СПГ бункеровка: техническое и операционное сопровождение (2021), Руководство по СПГ бункеровке (2014 г.), Правила для судов на СПГ (ред. 2017).

<sup>10</sup> Society of using Gas as a Marine Fuel – Общество использования газа в качестве топлива для морских судов.

<sup>11</sup> Society of International Gas Tanker and Terminal Operators – Общество международных операторов газовозов и терминалов.

через страны Балтийского региона они являются основой морской транспортной доступности Калининградской области РФ.

Рассматриваемые паромы имеют длину 199,9 м, ширину 27,4 м, высоту борта 14,7 м, коэффициент общей полноты 0,661. Ледовый класс рассматриваемых судов – Arc4. Верхняя грузовая палуба предназначена для размещения автопоездов, главная палуба – железнодорожных составов. Основные технико-эксплуатационные характеристики представлены на официальном сайте МИБ [14], а их обоснование – в статье [15].

Главная энергетическая установка этих судов представлена двумя двухтопливными двигателями Wärtsilä 12V34DF мощностью по 6 МВт. Работа данного газопоршневого двигателя основана на газодизельном процессе, при котором газозоодушная смесь поджигается в цилиндре от запальной (пилотной) дозы дизельного топлива [16]. Для обеспечения использования природного газа (ПГ) в качестве топлива данный двигатель имеет, среди прочих, следующие особенности устройства и комплектации:

- форсунки жидкого топлива выполнены в двухигольном исполнении: бóльшая игла используется в дизельном режиме, меньшая – в газодизельном для ввода в цилиндр запального топлива;
- впускные клапаны ПГ управляются автоматически и независимо, что обеспечивает подачу в цилиндр нужной дозы ПГ, зависящей, в частности, от метанового числа ПГ<sup>12</sup>;
- для исключения утечки природного газа в МО и наиболее быстрого её обнаружения, для последующего прекращения подачи газа, переключения двигателя в дизельный режим и выполнения операции продувки трубопроводов топливной системы двигателя инертным газом последние выполнены двустенными.

Для хранения, подачи природного газа к потребителям и бункеровки СПГ паромы проекта CNF19M оборудованы газотопливным комплексом LNGPac от Wärtsilä, основными компонентами которого являются:

- два танка хранения СПГ с вакуумно-перлитной изоляцией (внешний вид изображён на рис. 3) объёмом 300 м<sup>3</sup>,
- блок подготовки газового топлива,
- блок теплоносителя,
- две бункеровочные станции (по одной на борт).

Рассматриваемые танки СПГ относятся к типу С по классификации IMO и представляют собой два цилиндра, с двух сторон ограниченные доньями и вложенные один в другой (см. рис 3).

Физическая модель вакуумной изоляции подробно описана в [17]. Её изоляционный эффект достигается за счёт увеличения средней длины свободного пробега<sup>13</sup> молекул газа в пространстве между стенками при сниженном давлении в межстеночном пространстве. Наиболее заметное снижение теплопроводности (т.е. изоляционные свойства) достигается при таких значениях понижения давления, при которых средняя длина свободного пробега молекул больше, чем ширина межстеночного пространства. В таком случае молекулы газа практически перестанут сталкиваться между собой и изоляционные свойства будут определяться в основном характером взаимодействия газа со стенками внешнего и внутреннего сосудов. Однако в изоляционном пространстве при расстоянии между стенками внутреннего и внешнего резервуаров в 0,2 м необходимо создать такое разрежение, при котором давление, принимаемое за вакуум, составляет не более 0,022 Па<sup>14</sup>. Допустить меньшую степень разрежения и тем

<sup>12</sup> Метановое число – показатель, характеризующий детонационную стойкость газообразного топлива при сжатии. Число эквивалентно содержанию метана в ПГ, которое варьируется в широком диапазоне в зависимости от происхождения ПГ.

<sup>13</sup> Длина свободного пробега молекулы – это среднее расстояние, которое преодолевает частица за время между двумя последовательными столкновениями

<sup>14</sup> Выражая давление из формулы для определения длины свободного пробега молекул [25, с. 7]  $l = kT / [\sqrt{2}\pi\sigma^2(1 + C/T)p]$ , где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана,  $T = 273$  К – температура газа,  $\sigma = 3,7 \cdot 10^{-10}$  м – диаметр молекулы азота N<sub>2</sub>,  $C = 104$  К – постоянная Сазерленда; при длине свободного пробега молекул равной ширине изоляционного пространства, т.е.  $l = 0,2$  м.

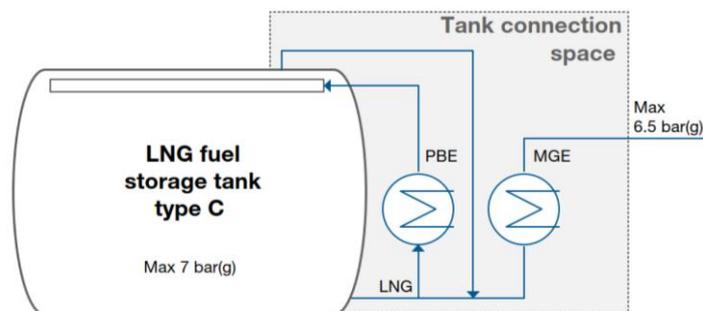
упростить и удешевить изготовление такого двустенного сосуда позволило заполнение его межстеночного пространства пористым материалом, в частности перлитом<sup>15</sup>, размер частиц которого не превышает 3 мм. В порошке перлита вакуум достигается уже при давлении в 1...100 Па [18].



**Рис. 3. Разрез двустенного резервуара с вакуумной изоляцией и танки СПГ на пароме «Маршал Рокоссовский»**

**Fig. 3. An incision of vacuum isolated double-wall tank and LNG tanks on «Marshall Rokossovskiy» ferry**

**Блок подготовки газового топлива** представляет собой совокупность теплообменников, трубопроводов и запорно-регулирующей арматуры. Процесс подготовки топлива в данном случае основан на поддержании давления внутри танка (см. рис. 4). Первый теплообменник, называемый РВЕ (Pressure build-up evaporator – испаритель, создающий давление), предназначен для испарения СПГ и возвращения его паров обратно в танк, что повышает давление и вызывает течение СПГ из танка во второй теплообменник МГЕ (Main gas evaporator – главный испаритель), в котором происходит процесс испарения и подогревания природного газа до необходимых температур (30–40 °С). Таким образом, расход природного газа регулируется теплообменом в РВЕ, в который СПГ поступает самотёком. Главным преимуществом такой схемы подготовки топлива является отсутствие криогенного насоса, подающего СПГ в испарители.



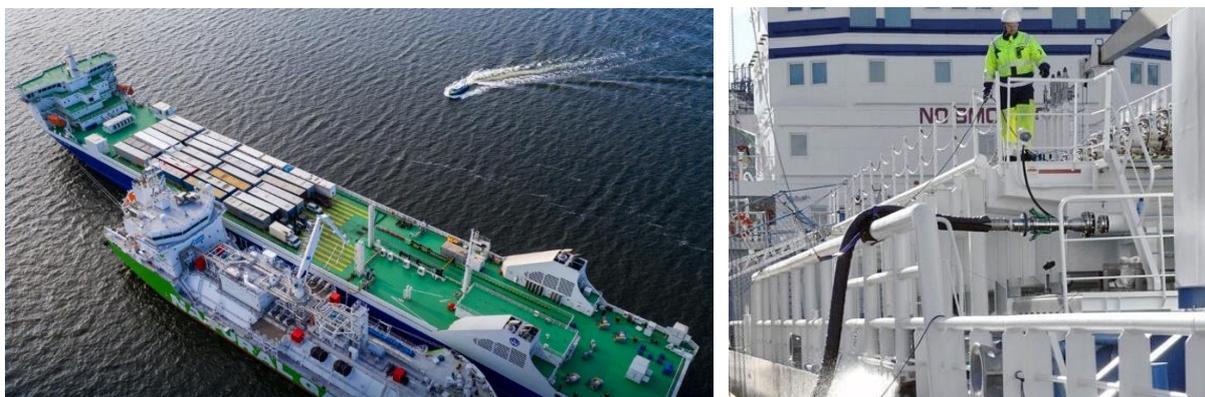
**Рис. 4. Принципиальная схема подготовки топлива при использовании танков с перлитно-вакуумной изоляцией**

**Fig. 4. The schematic diagram of fuel supplying in case of use the vacuum-perlite isolated tanks**

**Блок теплоносителя** обеспечивает подачу к теплообменникам греющего агента и подогрев его до необходимой температуры. В качестве теплоносителя, как правило, выступает водный раствор этилен- или пропиленгликоля. Сам теплоноситель подогревается водяным паром в отдельном теплообменнике, а его перемещение к испарителям СПГ и обратно осуществляется циркуляционным насосом.

<sup>15</sup> Перлит – стекловидный материал вулканического происхождения, основу которого составляет двуокись кремния. Для теплоизоляции аппаратов и машин используется вспученный перлитовый порошок с плотностью при свободной насыпке 100 кг/м<sup>3</sup>.

**Бункеровочный манифольд** включает в себя три патрубка, предназначенных для обмена с бункеровщиком (автоцистерной, бункеровочной станцией – в зависимости от способа бункеровки) азотом, СПГ и ПГ. Соединения патрубков с бункеровочными шлангами (см. рис. 5) имеют быстроразъёмное стандартизированное соединение, защищающее линии передачи СПГ при выходе бункеровочного манифольда за пределы рабочей зоны вследствие возникновения неконтролируемого движения судна. Такое соединение является частью системы ERS (Emergency release system – система аварийного разъединения), которая функционально связана с системой ESD (Emergency shut-down system – система аварийного отключения), предназначенной для закрытия предохранительных клапанов и остановки процессов бункеровки и подачи топливного СПГ потребителям. Система ESD срабатывает также автоматически при обнаружении возгорания или взрывоопасной концентрации ПГ, переполнении танков СПГ, превышении допустимого давления в газотопливной системе<sup>16</sup> и играет важную роль в обеспечении безопасности при обращении с СПГ.



**Рис. 5. Бункеровка парома «Маршал Рокоссовский» СПГ-бункеровщиком «Дмитрий Менделеев» и бункеровочный манифольд газомоторного судна**

Fig. 5. Bunkering of the «Marshall Rokossovskiy» with «Dmitriy Mendeleev» LNG bunkering vessel and bunkering manifold of LNG-powered ship

### **Особенности оборудования судна скруббером как альтернативного способа соответствия экологическим нормам**

Другим эффективным способом соответствия современным экологическим нормам по выбросу загрязняющих веществ в атмосферу, как отмечалось, является оборудование судов т.н. скрубберами – устройствами очистки газов от вредных примесей путём распыления в потоке выхлопных газов абсорбента, в качестве которого выступает морская вода или водный раствор щёлочи. Типы и принципы работы скрубберов были описаны авторами в [1].

Для сравнительного анализа альтернативных способов достижения соответствия действующим нормам вредных выбросов примем к рассмотрению еще 2 гипотетических судна, имеющих полное совпадение их назначения и технико-эксплуатационных характеристик с таковыми у паромов проекта CNF19M, но главные двигатели, входящие в состав их СЭУ, предполагаются потребляющими только жидкое топливо (HSFO, MDO, MGO). В качестве района эксплуатации этих судов также рассматривается Балтийское море (относящееся к зонам SECA).

На одном из этих 2 судов, эксплуатируемом в зонах особого контроля выбросов, в качестве топлива предполагается использование дорогостоящего MGO (обозначим его как CMF19tr), а другое рассматривается как оборудованное скруббером (обозначим его как CMF19scr) и использующее дешёвый HSFO.

Предполагается, что условное судно CMF19scr оборудовано двумя распыливающими скрубберами гибридного типа Wärtsila (рис. 6) – по одному в кожухе каждой выхлопной

<sup>16</sup> MARVS – максимально допустимое установочное давление предохранительных клапанов.

трубы. В прибрежной зоне для очистки выхлопных газов от окислов серы такими скрубберами используется водный раствор NaOH, а вне прибрежных зон – морская вода. Габаритные размеры блока очистки: диаметр  $D = 2$  м, высота  $H = 5,81$  м. Вес этого скруббера в рабочем состоянии составляет 4,1 т [19].

Оснащение рассматриваемого судна как снабжённого реально существующим скрубберным оборудованием, по которому известны требования к его размещению, компоновка, комплектация, массогабаритные характеристики, параметры потребляемой мощности и расходных средств, позволяет получить относительно надёжные данные для проведения сравнения исследуемых вариантов достижения соответствия экологическим нормам.



**Рис. 6. Внешний вид скруббера Wärtsilä V-SOx и его расположение в схеме выхлопной системы судна**

**Fig. 6. Outside view of Wärtsilä V-SOx scrubber and its placement in exhaust gas system diagram**

Особенностью скрубберов Wärtsilä является расположение всего используемого в процессе очистки абсорбента не в циркуляционном баке, который, как правило, размещается несколько ниже блока очистки, а в картере скруббера, что увеличивает негативное влияние значительной массы устанавливаемого скруббера на остойчивость судна.

Для работы в закрытом цикле скруббер оборудован системой подачи щёлочи, которая в автоматическом режиме добавляет 50 %-й раствор NaOH в рабочую жидкость на основе показаний датчиков pH. В эту систему входит также бункеровочный трубопровод и танк щёлочи для приёма с берега и хранения жидкого натра. Массовый расход 50 %-го раствора NaOH по оценке [19] зависит от степени загрязнения, степени очистки и расхода выхлопных газов и составляет от 6 до 15 % расхода топлива.

При работе скруббера в закрытом цикле образуются продукты очистки, которые удаляются из абсорбента путём его обработки в блоке очистки слива. В результате отработавшая жидкость разделяется на очищенную воду, соответствующую требованиям ИМО МЕРС.184 (59), и шлам, подлежащий сдаче на берег. Количество образуемого шлама также, по данным [19], зависит от качества топлива, образующегося количества выхлопных газов, приблизительно может быть определено в зависимости от мощности двигателя и составляет 0,1–0,4 кг/МВт·ч.

Осуществляется непрерывный контроль состава выхлопных газов. По результатам анализа проб, забираемых в месте отвода выхлопных газов из скруббера, регулируется щёлочность и размер подачи рабочего раствора абсорбента, а сами результаты фиксируются. Также контролируется и фиксируется состав сбрасываемой за борт очищенной воды.

Необходимо отметить, что потребляемая скруббером мощность составляет 0,4–0,6 % от мощности двигателя [20]. Следует обратить внимание на высокий уровень автоматизации работы и самого двигателя, и компонентов оборудования скрубберной установки.

**Расчёт и анализ экономических показателей сравниваемых вариантов судов, использующих различные альтернативные способы обеспечения соответствия нормам Приложения VI к Конвенции МАРПОЛ 73/78**

Сравнение экономической эффективности способов обеспечения соответствия экологическим нормам произведено путём сравнения стоимостей соответствующих операционных затрат у судов с тем или иным из рассматриваемых способов. К таким затратам относятся, в первую очередь, затраты на топливо (см. табл. 1), а также эксплуатационные затраты на потребляемую щёлочь для скруббера.

В табл. 1 также приведены затраты на топливо при эксплуатации традиционного варианта парома при допущении отсутствия рассматриваемых экологических требований (т.е. в таких условиях, какими они были до включения Балтийского моря в число зон особого контроля выбросов).

Ввиду того что в качестве района эксплуатации рассматривается Балтийское море, расчётные значения стоимостей различных видов топлива здесь определяются исходя из рыночных стоимостей на бункерном рынке именно в этом районе (см. рис. 2).

Таблица 1 / Table 1

**Затраты на топливо для сравниваемых судов**  
Fuel costs for compared vessels

Вариант проекта	CMF19tr (в допущении отсутствия экологических ограничений)	CMF19tr	CMF19scr	CMF19M	
	HSFO			MGO	LNG
Используемое топливо	HSFO	MGO	HSFO	LNG	MDO (MGO)
Потребление топлива в год, тыс. т	12,73	13,74 <sup>17</sup>	12,97 <sup>18</sup>	9,90	0,13
Средняя стоимость используемого топлива, \$/т	441	782	441	658	782

Величина ежегодных затрат на поставку щёлочи для скруббера определяется следующими параметрами:

- продолжительностью эксплуатации скруббера при закрытом цикле T: здесь принято, что 30 % времени судно эксплуатируется в акваториях, где сброс отработавшего абсорбента запрещён. Таким образом,  $T = 365 \cdot 24 \cdot 30\% = 2628$  часов/год;
- рыночной стоимостью 50 %-го раствора NaOH в 0,45 \$/кг [21];
- расходом щёлочи при закрытом цикле, рассчитанном по [20], в зависимости от расхода топлива (см. табл. 1) и содержания серы в топливе (HSFO – 3,5 %):  $Q = 0,342$  т/ч.

Ежегодный расход 50 %-го раствора NaOH  $M_{щ}$  определён следующим образом:

$$M_{щ} = T \cdot Q = 899 \text{ т} .$$

Сравниваемые операционные стоимостные затраты, рассчитанные по годам эксплуатации судов, реализующих каждое один из 3 различных способов обеспечения соответствия требованиям норм ИМО по содержанию вредных примесей, представлены в табл. 2. Указанные выше суммарные операционные затраты за рассматриваемый период эксплуатации (от 1 года до 25 лет) рассчитаны по данным табл. 2 и представлены в табл. 3 и на графиках (рис. 7).

Необходимо отметить, что результаты экономических расчётов издержек, представленные в табл. 2, 3 и на графиках (рис. 7), учитывают инфляцию, годовая величина которой здесь принята на уровне 7,68 %.

<sup>17</sup> Допускается, что потребление топлива в год для судов CMF19tr и CMF19scr вычисляется исходя из соотношения теплотворных способностей газойля, мазута и СПГ (38 МДж/кг, 41 МДж/кг и 50 МДж/кг соответственно).

<sup>18</sup> С учётом дополнительных затрат энергии 0,5 % от суммарной мощности ГД на функционирование скруббера.

Таблица 2 / Table 2

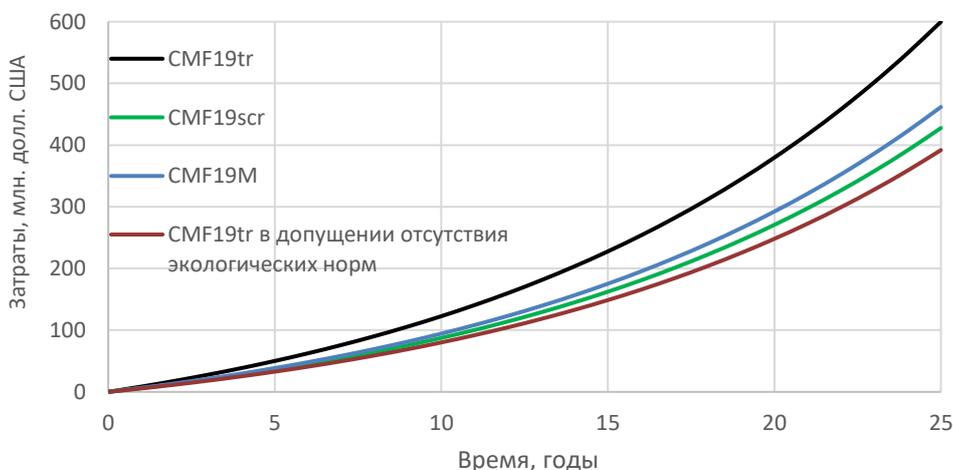
**Рассматриваемые эксплуатационные затраты для проектов CMF19tr, CMF19scr, CMF19M по годам эксплуатации, млн долл. США**  
 Considered operating costs for CMF19tr, CMF19scr, CMF19M conditional projects by years of operation, millions of USA dollars

Проект	CMF19tr (в допущении отсутствия экологических ограничений)		CMF19scr			CMF19M		
	IFO 380	MGO	IFO 380	NaOH	Сумма	LNG	MGO	Сумма
1	5,6	8,60	5,72	0,41	6,13	6,52	0,10	6,62
2	6,0	9,26	6,16	0,44	6,60	7,02	0,11	7,13
...	...	...	...	...	...	...	...	...
10	10,9	16,7	11,1	0,79	11,9	12,7	0,20	12,9
...	...	...	...	...	...	...	...	...
24	30,8	47,1	31,4	2,24	33,6	35,7	0,55	36,3
25	33,2	50,8	33,8	2,41	36,2	38,5	0,59	39,1

Таблица 3 / Table 3

**Рассматриваемые эксплуатационные затраты для проектов CMF19tr, CMF19scr, CMF19M за конкретный период эксплуатации, млн долл. США**  
 Considered operating costs for CMF19tr, CMF19scr, CMF19M conditional projects for a specific period of operation, millions of USA dollars

Проект/ Длительность эксплуатации, годы	CMF19tr (в допущении отсутствия экологических ограничений)	CMF19tr	CMF19scr	CMF19M
1	5,6	8,60	6,13	6,62
2	11,7	17,9	12,7	13,7
...	...	...	...	...
10	80,1	122,7	87,5	94,4
...	...	...	...	...
24	358,7	549,1	391,5	422,7
25	391,9	599,8	427,7	461,7



**Рис. 7. Сумма рассматриваемых затрат на эксплуатацию по годам для проектов CMF19tr, CMF19scr и CMF19M**

Fig. 7. The sum of operating costs under operation for CMF19tr, CMF19scr, CMF19M conditional projects by years, millions of USA dollars

Согласно приведённым в табл. 1–3 данным и графикам на рис. 7, можно констатировать следующее:

– введение рассматриваемых экологических требований привело к значительному росту издержек при эксплуатации судна: в рассматриваемом случае увеличение затрат на топливо для традиционного варианта парома, использующего «очищенное», более дорогое топливо, достигает 53 %;

– сократить эксплуатационные затраты на топливо на 29 % можно путём оборудования судна скруббером. При этом в абсолютном выражении разница между рассматриваемыми эксплуатационными затратами для проектов CMF19tr и CMF19scr за 4 года составит 11,1 млн долл. США, что превысит величину стоимости оснащения судна скруббером, которую, основываясь на данных [27], можно оценить в 8 млн долл. США;

– газомоторное судно в рассматриваемых условиях также требует меньше на 23 % затрат на топливо относительно традиционного варианта парома;

– для судов CMF19scr и CMF19M экономия рассматриваемых эксплуатационных затрат за 10 лет, по сравнению с судном CMF19tr, составит 35,2 и 28,3 млн долл. США (см. табл. 3) соответственно, что позволяет сделать вывод о том, что в рассматриваемом случае судно со скруббером требует наименьших эксплуатационных затрат по стоимости расходуемого топлива.

В предыдущей статье [1] в результате аналогичного сравнения было получено, что эксплуатация газомоторного танкера класса «Афрамекс» требует меньших операционных затрат, чем аналогичный танкер со скруббером. В настоящей работе получены иные результаты, в соответствии с которыми эксплуатация газомоторного парома, наоборот, связана с большими операционными затратами, чем эксплуатация аналогичного судна со скруббером. Различие в полученных результатах объясняется, в первую очередь, разными значениями расчётных стоимостей топлива: в данном исследовании, как было указано выше, рассматриваются стоимости топлив на паромной линии Усть-Луга – Балтийск (а именно в порту Усть-Луга), а в случае с танкерами класса «Афрамекс» в качестве расчётных были приняты стоимости топлив в европейских портах Роттердам (СПГ) и Гамбург (HSFO, VLSFO, ULSFO, MGO). Указанные выше обстоятельства позволяют сделать вывод о значительном влиянии на результаты подобных расчётов действующих цен на рассматриваемые виды топлива в районах реальных маршрутов (линий), по которым судно будет совершать переходы наиболее часто.

Необходимо ещё раз подчеркнуть, что окончательная оценка результатов сравнения должна включить необсуждавшиеся здесь дополнительные затраты, связанные с эксплуатацией скруббера на судне пр. CMF19scr, а для ГМС – пр. CMF19M, соответственно, также дополнительные затраты, связанные с обеспечением его спецоборудования, по сравнению с традиционными судами [1].

Учитывая, что затраты на топливо уже составляют ок. 30 % [22] от общей суммы затрат на эксплуатацию судна, становится очевидно, что упомянутые выше дополнительные расходы на эксплуатацию каждого из сравниваемых альтернативных вариантов много меньше рассмотренных здесь основных затрат и могут быть оценены только приближённо и в значительной зависимости от условий эксплуатации и меняющихся ставок и нормативов. Определяющими, таким образом, принимаются факторы, рассмотренные выше.

## Выводы и заключение

На основе вышеизложенного исследования сделаны следующие выводы:

1. В условиях ужесточения экологических норм и запрета на использование высокосернистого мазута увеличиваются эксплуатационные затраты судовладельцев, что связано с реализацией различных способов соблюдения экологических норм, таких как оборудование судна, по-прежнему использующего традиционные виды углеводородного топлива, скруббером или использование «очищенного» (низкосернистого мазута, полученного барботированием его водородом) или «чистого» в отношении содержания серы топлива (низкосернистых дистиллятов мазута или альтернативных видов топлива), но сегодня, прежде всего, сжиженного природного газа.

2. Увеличение затрат на топливо, связанное с переходом на низкосернистые его сорта, для традиционного судна, эксплуатируемого исключительно в зонах особого контроля выбросов, достигает 53 %. Это цена достижения соответствия требованиям новых экологических норм ИМО самым простым способом без какого-либо переоборудования судна.

3. В то же время оборудование судна скруббером позволяет продолжить использование дешёвого высокосернистого мазута, но его установка связана со значительными капиталовложениями, а эксплуатация – с затратами на постоянное его снабжение щёлочью и электроэнергией от судовой электростанции. Учитывая это, результаты расчёта позволяют констатировать: суммарные издержки на снабжение топливом и раствором щёлочи судна, оборудованного скруббером, оказываются меньшими на 29 % по сравнению с издержками на топливо для традиционного судна, использующего в качестве такового исключительно дорогостоящий низкосернистый мазут.

4. Скруббер, обладая значительными массогабаритными характеристиками, размещается в кожухе дымовой трубы судна, что может оказать заметное влияние на остойчивость судна. Влияние это будет более значительным, если рабочий раствор абсорбента размещён не в отдельном танке, а непосредственно в картере скруббера, что необходимо учитывать при выборе модели и производителя.

5. Среди всех альтернативных видов топлива (таких как водород, метанол, аммиак) приоритетом пока обладает природный газ как наиболее освоенный и распространённый и с точки зрения производства, и с точки зрения его потребления источник энергии.

6. Постройка ГМС также связана с большими капиталовложениями, чем постройка традиционного судна, однако использование недорогого по сравнению с альтернативами СПГ в качестве топлива позволяет значительно снизить затраты на эксплуатацию судна.

7. Ёмкости хранения СПГ с вакуумной изоляцией, работающие в системе подачи газового топлива по принципу вытеснения СПГ принудительно испаряемым ПГ, должны иметь высокий запас прочности по восприятию внутреннего давления газообразной субстанции, поскольку давление в таких системах варьируется в широких диапазонах (в приведённом примере до 0,7 МПа).

8. Для танков СПГ типа С объёмом до 300–400 м<sup>3</sup> может эффективно применяться вакуумная (в т.ч. вакуумно-перлитная) изоляция, а при больших объёмах – изоляция из пенополиуретана.

9. По результатам произведённых расчётов судно со скруббером обладает меньшими на 7 % рассматриваемыми эксплуатационными расходами, чем газомоторное, что противоречит выводам [1] и обусловлено здесь учётом фактических стоимостей различных видов топлива в несколько ином районе Мирового океана: в статье [1] рассматривались фактические стоимости топлив в зарубежных портах (Роттердам, Гамбург), а в данной статье – в российских портах (Усть-Луга). При этом в приведённом случае экономия на рассматриваемых эксплуатационных затратах газомоторного судна относительно традиционного составляет 23 %, а судна со скруббером – 29 %.

10. При выполнении экономических расчётов в рамках сравнения способов достижения соответствия судна экологическим нормам крайне важно учитывать действительные стоимости рассматриваемых видов топлива в районах Мирового океана, где будут пролегать основные маршруты проектируемого судна.

11. Несмотря на более заметный в рассматриваемом случае экономический эффект судна со скруббером относительно остальных вариантов, при выборе способа достижения соответствия экологическим нормам судна на этапе его проектирования необходимо принимать во внимание высокие темпы развития экологических ограничений (вплоть до полного запрета использования HSFO).

Следует отметить, что Международной морской организацией (ИМО) скрубберы рассматриваются как временное решение проблемы выбросов загрязняющих веществ с выхлопными газами судов, а ПГ – «переходным» источником энергии для судовых ДВС [28]. Однако, ввиду отсутствия серы в природном газе и меньшего содержания оксидов азота в выхлопных

газах газопоршневых двигателей, применение СПГ в качестве топлива имеет всё-таки более долгосрочные перспективы, чем очистка выхлопных газов от оксидов серы скрубберами.

#### ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Г.Ф. Демешко – разработка концепции и дизайна исследования; В.М. Кашаев – сбор данных, подготовка и редактирование текста; Г.Ф. Демешко, В.М. Кашаев – анализ и интерпретация результатов. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

G.F. Demeshko – study conception and design; V.M. Kashaev – data collection, draft manuscript preparation; G.F. Demeshko, V.M. Kashaev – analysis and interpretation of results. All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflict of interest.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Демешко Г.Ф., Кашаев В.М. Сравнительный анализ альтернативных способов обеспечения соответствия экологическим нормам выбросов выхлопных газов судов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2024. № 4(410). С. 111–126. EDN: ARLSNL
2. ИМО. МАРПОЛ 73/78. Книга III, пересмотренное Приложение VI к МАРПОЛ «Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов». СПб: ЗАО ЦНИИМФ, 2012.
3. OilMonster. Bunker fuel prices. URL: <https://www.oilmonster.com/bunker-fuel-prices/west-north-europe/ust-luga/136> (дата обращения: 27.09.2023).
4. Климентьев А.Ю., Леонтьев С., Сульдин А. Карта Российской СПГ отрасли 2024. Справочные материалы. URL: <http://agaz.org/Материалы/> (дата обращения: 27.09.2023).
5. Гайнуллин Ф.Г., Гриценко А.И., Васильев Ю.Н., Золотаревский Л.С. Природный газ как моторное топливо. М.: Недра, 1986. 255 с.
6. Елифанов В.С. Эксплуатация судовых энергетических установок на природном газе. М.: ТрансЛит, 2010. 216 с.
7. Фёдорова Е.Б. Современное состояние и развитие мировой индустрии сжиженного природного газа: технологии, оборудование. М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2011. 159 с. EDN: QNFHLH
8. Реуцкий А.С. Особенности проектирования судов-бункеровщиков сжиженным природным газом: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2021. 27 с.
9. Рахимов В.О., Коробков Г.Е. Определение радиуса аварийного разлива сжиженного природного газа на водной поверхности // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2011. № 3. С. 21–24.
10. Ведрученко В.Р., Крайнов В.В., Кокшаров М.В., Лазарев Е.С., Кузнецова Д.К. О технических решениях при переводе транспортных и судовых ДВС на использование газообразного топлива // Омский научный вестник. 2014. № 3. С. 186–189. EDN: TKDKHZ
11. Безюков О.К., Жуков В.А., Воробей К.А. Анализ энергоэкологического эффекта применения газопоршневых двигателей в судовых энергетических установках // Вестник ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова. 2015. № 6(34). С. 143–149.
12. РМРС. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XVII «Дополнительные знаки символа класса и словестные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна». Санкт-Петербург, 2024. С. 141–176.
13. Газпром International. Информационно-справочный материал о мировых тенденциях развития применения СПГ в качестве топлива на водном транспорте. URL: <https://www.gazprom-international.ru/d/textpage/9b/155/mirovye-praktiki-primeneniya-spg-na-vodnom-transporte.pdf>
14. Морское инженерное бюро. Проект CNF19M. URL: <https://mebspb.com/fery/CNF19M.html>
15. Егоров Г.В., Ильницкий И.А., Егоров А.Г. Обоснование главных параметров железнодорожного парома-газохода для линии Усть-Луга – Балтийск // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Спец. вып. 1. С. 208–215.
16. Дорохов А.Ф., Апкаров И.А., Хоан Коанг Лыонг. Особенности применения газообразных топлив в судовых энергетических установках // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2012. № 2. С. 70–75.

17. Зоря Е.И., Гладков И.В., Нецадимов В.С., Орехова И.В. Потери сжиженного природного газа при хранении на КриоАЗС в полуизотермическом резервуаре // Технологии нефти и газа. 2023. № 5(148). С. 52–56.
18. БелКрио. Вакуумно-перлитная теплоизоляция. URL: <https://tdbelocrio.ru/news/sravnivaem-perlitno-vakuumnuyu-i-ekrannno-vakuumnuyu-izolyacziyu-kriogennyh-sosudov/>
19. Wärtsilä. Руководство на изделие скруббер (газоочиститель) Wärtsilä. URL: [https://www.wartsila.com/docs/default-source/local-files/russia/products/project-guides/w%C3%A4rtsil%C3%A4-scrubber-product-guide-rev-c\\_rus.pdf](https://www.wartsila.com/docs/default-source/local-files/russia/products/project-guides/w%C3%A4rtsil%C3%A4-scrubber-product-guide-rev-c_rus.pdf)
20. Wärtsilä. Руководство по средствам защиты окружающей среды компании Wärtsilä. URL: <https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/egc/product-guide-o-env-environmental-solutions.pdf>
21. Стоимость 50 %-го водного раствора натра едкого. URL: <https://a8800.ru/catalog/cshelochi/natredkij-ochishhennyij-50>
22. Ятчук К.В. Совершенствование методов планирования расходов на топливо судоходных компаний речного флота: дис. ... канд. экон. наук. Новосибирск, 2017. 145 с. URL: [http://www.stu.ru/science/theses\\_get\\_file.php?id=1024&name=1024.pdf](http://www.stu.ru/science/theses_get_file.php?id=1024&name=1024.pdf)
23. Магаровский В.В., Половинкин В.Н., Пустошный А.В., Савченко О.В. Новое в международной политике снижения эмиссии парниковых газов и необходимые мероприятия в морском секторе. Ч. 3. Альтернативное топливо как мера для достижения целевых показателей эмиссии парниковых газов // Труды КГНЦ. 2023. № 4(406). С. 174–190.
24. Демешко Г.Ф., Власьев М.В. Анализ состояния и организации работы мирового транспортного флота как основного звена международной торговли // Труды Крыловского государственного научного центра. 2023. Т. 4, № 406. С. 146–161.
25. Иванов В.И. Вакуумная техника. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2016. 129 с.
26. Kristin Omholt-Jensen. Global Sulphur regulations, ECA and SECA zones. URL: <https://www.maritimeoptima.com/insights/global-sulphur-regulations-eca-seca-zones>
27. Scrubbers: The costs & Retrofit Time. URL: <https://maritimehub.co.uk/scrubbers-the-costs-retrofit-time/>
28. Nippon Kaiji kyokai (ClassNK). Pathway to Zero-Emission InInternational Shipping – Understanding the 2023 IMO GHG Strategy. URL: [https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/info\\_service/ghg/PathwaytoZero-EmissioninInternationalShipping\\_ClassNK\\_EN.pdf](https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/info_service/ghg/PathwaytoZero-EmissioninInternationalShipping_ClassNK_EN.pdf)

## REFERENCES

1. Demeshko G.F., Kashaev V.M. Comparative analysis of alternative ways to meet the limits of exhaust gas emissions by ships. *Transactions of the Krylov State Research Centre*, 2024, no. 4(410), pp. 111–126. (In Russ.).
2. IMO. MARPOL 73/78. Book III, revised Annex VI to MARPOL "Rules for the prevention of air Pollution from ships", 2012. (In Russ.).
3. OilMonster. Bunker fuel prices. URL: <https://www.oilmonster.com/bunker-fuel-prices/west-northern-europe/ust-luga/136> (accessed: 27.09.2023).
4. Klimentiev A., Leontiev S., Suldin A. Map of the Russian LNG industry 2024. Reference materials. (In Russ.). URL: <http://agaz.org/Материалы>
5. Gainullin F.G., Gritsenko A.I., Vasiliev Yu.N., Zolotarevsky L.S. Natural gas as a motor fuel. Moscow, Nedra Publ., 1986, 255 p. (In Russ.).
6. Epifanov V.S. Operation of marine power plants powered by natural gas. Moscow, TransLit Publ., 2010, 216 p. (In Russ.).
7. Fedorova E.B. The current state and development of the global liquefied natural gas industry: technologies, equipment. Moscow, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2011, 159 p. (In Russ.).
8. Reutsky A.S. Features of the design of bunkering vessels with liquefied natural gas: Ph. D. thesis. St. Petersburg, 2021, 27 p. (In Russ.).
9. Rakhimov V.O., Korobkov G.E. Determination of the radius of an emergency spill of liquefied natural gas on the water surface. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*, 2011, no. 3, pp. 21–24. (In Russ.).
10. Vedruchenko V.R., Krainov V.V., Koksharov M.V., Lazarev E.S., Kuznetsova D.K. On technical solutions for the conversion of transport and marine internal combustion engines to the use of gaseous fuels. *Omsk Scientific Bulletin*, 2014, no. 3, pp. 186–189. (In Russ.).
11. Bezyukov O.K., Zhukov V.A., Vorobey K.A. Analysis of the energy-ecological effect of using gas piston engines in marine power plants. *Bulletin of Admiral Mararov State University of Maritime and Inland Shipping*, 2015, no. 6(34), pp. 143–149. (In Russ.).

12. RMRS. Rules for the classification and construction of sea-going ships. Part XVII: «Distinguishing marks and descriptive notations in the class notation specifying structural and operational particulars of ships». St. Petersburg, 2024. P. 141–176. (In Russ.).
13. Gazprom International. Information and reference material on global trends in the use of LNG as a fuel in water transport. URL: <https://www.gazprom-international.ru/d/textpage/9b/155/mirovye-praktiki-primeneniya-spg-na-vodnom-transporte.pdf?ysclid=m2oqk2fg8n322835014> (In Russ.).
14. Marine Engineering Bureau. The CNF19M project. URL: <https://mebspb.com/fery/CNF19M.html> (In Russ.).
15. Egorov G.V., Ilitsky I.A., Egorov A.G. Substantiation of the main parameters of a gas-powered railway ferry for the Ust-Luga – Baltiysk line. *The Thansactions of Krylov State Research Centre*, 2019, Special issue 1, pp. 208–215. (In Russ.).
16. Dorokhov A.F., Apkarov I.A., Hoang Kuang Luong. Features of the use of gaseous fuels in marine power plants. *Vestnik of Astrakhhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technolpgies*, 2012, no. 2, pp. 70–75. (In Russ.).
17. Zorya E.I., Gladkov I.V., Neschadimov V.S., Orekhova I.V. Losses of liquefied natural gas during storage at cryoase in a semi-isothermal tank. *Scientific and Technological Journal: Oil and Gas Technologies*, 2023, no. 5(148), pp. 52–56 (In Russ.).
18. BelKrio. Vacuumno-perlite thermal insulation. URL: <https://tdbelocrio.ru/news/sravnivaem-perlitno-vakuumnuyu-i-ekranno-vakuumnuyu-izolyacziyu-kriogennyh-sosudov/> (In Russ.).
19. Wärtsilä. Product manual Wärtsilä scrubber (gas purifier). URL: [https://www.wartsila.com/docs/default-source/local-files/russia/products/project-guides/w%C3%A4rtsil%C3%A4-scrubber-product-guide-rev-c\\_rus.pdf?sfvrsn=73676f44\\_2](https://www.wartsila.com/docs/default-source/local-files/russia/products/project-guides/w%C3%A4rtsil%C3%A4-scrubber-product-guide-rev-c_rus.pdf?sfvrsn=73676f44_2)
20. Wärtsilä. The Wärtsilä Environmental Protection Guidelines. URL: <https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/egc/product-guide-o-env-environmental-solutions.pdf?sfvrsn=14>
21. The cost of 50% aqueous solution of caustic soda. (In Russ.). URL: <https://a8800.ru/catalog/cshelochi/natr-edkij-ochishhennyij-50>
22. Yatchuk K.V. Improvement of methods of planning fuel costs for shipping companies of the river fleet: PhD tsesis: 08.00.05. Novosibirsk, 2017. (In Russ.). URL: [http://www.stu.ru/science/theses\\_get\\_file.php?id=1024&name=1024.pdf](http://www.stu.ru/science/theses_get_file.php?id=1024&name=1024.pdf)
23. Magarovskiy V.V., Polovinkin V.N., Pustoshny A.V., Savchenko O.V. New developments in the international policy of reducing greenhouse gas emissions and necessary measures in the marine sector. Part 3. Alternative fuels as a measure to achieve greenhouse gas emission targets. *The Thansactions of Krylov State Research Centre*, 2023, no. 4(406), pp. 174–190. (In Russ.).
24. Demeshko G.F., Kashaev V.M. Comparative analysis of alternative ways to ensure compliance with environmental standards of marine exhaust emissions. *The Thansactions of Krylov State Research Centre*, 2024, no. 4(410), pp. 111–126. (In Russ.).
25. Ivanov V.I. Vacuum technology: Textbook. St. Petersburg: ITMO University, 2016. 129 p. (In Russ.).
26. Kristin Omholt-Jensen. Global Sulphur regulations, ECA and SECA zones. URL: <https://www.maritimeoptima.com/insights/global-sulphur-regulations-eca-seca-zones>
27. Maritime Hub. Scrubbers: The costs & Retrofit Time. URL: <https://maritimehub.co.uk/scrubbers-the-costs-retrofit-time/>
28. Nippon Kaiji kyokai (ClassNK). Pathway to Zero-Emission InInternational Shipping – Understanding the 2023 IMO GHG Strategy. URL: [https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/info\\_service/ghg/PathwaytoZero-EmissioninInternationalShipping\\_ClassNK\\_EN.pdf](https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/info_service/ghg/PathwaytoZero-EmissioninInternationalShipping_ClassNK_EN.pdf)

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Демешко Геннадий Фёдорович** – доктор технических наук, профессор кафедры проектирования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

✉ [morcenter@mail.ru](mailto:morcenter@mail.ru).

**Gennady F. Demeshko**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russian Federation).

**Кашаев Владислав Михайлович** – аспирант Департамента морской техники и транспорта Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация).

✉ [kashaev.vm@dvfu.ru](mailto:kashaev.vm@dvfu.ru), <https://orcid.org/0009-0006-4915-4504>

**Vladislav M. Kashaev**, Postgraduate Student, Department of Marine Engineering and Transport, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 11.02.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 24.02.2025.

Принята к публикации / Accepted: 18.03.2025.