

# СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-730-743

## ADVANCED WATER TRANSPORT TECHNOLOGIES FOR LIMITING THE GREENHOUSE EFFECT

**G. E. Zhivljuk, A. P. Petrov**

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

*It is noted that the shipping industry makes a significant contribution to the total emission of carbon-acid gas into the global air basin due to the combustion of fossil hydrocarbon fuels by ship power plants. In April 2018, IMO adopted an ambitious new strategy to reduce greenhouse gas emissions for shipping. In accordance with the adopted strategy, it is planned to gradually reduce the average intensity of carbon dioxide emissions per ton-mile by 40 % by 2030 and by 70 % by 2050. This study examines the main directions of improving the modern fleet, including: improving the logistics of transportation; further improvement of the quality of the vessel hydrodynamic parameters; improvement of the characteristics of power generating equipment and units of the ship power plant systems; replacement of the used fossil fuels with alternative ones, which are potentially capable, with an integrated approach, to ensure the tasks fulfillment set by the strategy. Attention is drawn to the fact that in terms of achieving the goals of the IMO strategy, the use of alternative fuels is of particular importance, as a direction that can provide up to 100 % reduction in greenhouse gas emissions. The various possible options for alternative fuels, including liquefied natural gas, carbon-neutral fuels based on carbon — biofuels and synthetic fuels (electric fuels), and carbon-free fuels are considered and the prospects for their use are also analyzed. The peculiarities of the transition to alternative power sources for ship power plants for various segments of the world fleet are considered in the paper.*

*Key words: ship power plant, greenhouse effect, CO<sub>2</sub> emissions, IMO strategy, ways to reduce greenhouse gas emissions, decarbonization of fuel, carbon-free fuels, promising water transport technologies to curb the greenhouse effect.*

**For citation:**

Petrov, Aleksandr P., and Grigorij E. Zhivljuk. “Advanced water transport technologies for limiting the greenhouse effect.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 13.5 (2021): 730–743. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-730-743.

**УДК 621.43.074**

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА ДЛЯ ОГРАНИЧЕНИЯ ПАРНИКОВОГО ЭФФЕКТА

**Г. Е. Живлюк, А. П. Петров**

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

*В статье отмечается, что судоходная отрасль вносит ощутимо весомый вклад в суммарную эмиссию углекислого газа в мировой воздушный бассейн за счет сжигания ископаемых углеводородных топлив судовыми энергетическими установками. В апреле 2018 г. ИМО приняла новую стратегию сокращения выбросов парниковых газов для судоходства, в соответствии с которой предполагается поэтапное снижение средней интенсивности выбросов диоксида углерода на тонно-милю на 40 % к 2030 г. и на 70 % к 2050 г. В данном исследовании рассмотрены основные направления совершенствования современного флота, в том числе совершенствование логистического обеспечения перевозок, дальнейшее повышение качества гидродинамических параметров судна, улучшение характеристик энергогенерирующего оборудования и агрегатов систем судовой энергетической установки, замена используемых ископаемых видов*

топлива на альтернативные, потенциально способные при комплексном подходе обеспечить выполнение поставленных стратегией задач. Обращается внимание на то, что в плане достижения целей стратегии ИМО особое значение приобретает использование альтернативных видов топлива как направление, способное обеспечить до 100 % сокращения выбросов парниковых газов. Рассмотрены различные возможные варианты альтернативных видов топлива, в том числе сжиженный природный газ; углерод-нейтральные топлива на основе углерода: биотоплива и синтетические топлива (электротоплива); безуглеродные топлива, а также проанализированы перспективы их использования. В работе уделено внимание особенностям перехода к альтернативным источникам питания судовых энергетических установок для различных сегментов мирового флота.

*Ключевые слова:* судовая энергетическая установка, парниковый эффект, выбросы CO<sub>2</sub>, стратегия ИМО, пути сокращения выбросов парниковых газов, декарбонизация топлива, безуглеродные топлива, перспективные технологии водного транспорта для сдерживания парникового эффекта.

**Для цитирования:**

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

### **Введение (Introduction)**

Ведущие климатологи сходятся во мнении, что климат планеты имеет тенденции к всемирному потеплению [1], [2]. Считается, что причиной подобных изменений является *парниковый эффект*, состоящий в насыщении нижних слоев атмосферы Земли газами, обладающими прозрачностью в видимом оптическом диапазоне длин волн и имеющими высокую поглощающую способность в среднем и инфракрасном диапазонах, так называемыми *парниковыми* газами (ПГ). К ним относятся водяной пар H<sub>2</sub>O, углекислый газ CO<sub>2</sub>, метан CH<sub>4</sub>, оксиды азота NO<sub>x</sub> и др. Водяной пар, являющийся основным ПГ в атмосфере, обеспечивает более чем 60 % парникового эффекта. Однако конденсация пара, выраженная в образовании облачности, напротив, ведет к экранированию солнечного излучения, тем самым уменьшая общее количество тепловой энергии, достигающей поверхности Земли, т. е. приводит к *антипарниковому эффекту*. В этой связи на первый план выдвигается углекислый газ, который является причиной создания до 26 % парникового эффекта. Остальные менее 10 % ПГ не оказывают столь значительного влияния на образование парникового эффекта ввиду низкой концентрации их в атмосфере и высокой способности к деструктуризации.

Основным источником углекислого газа являются вулканическая активность планеты и антропогенные факторы. Существуют исследования, свидетельствующие о том, что с момента начала машинной индустриальной цивилизации (1750 г.) концентрация углекислого газа в атмосфере Земли выросла на 46 %, составив 405 ppm, и наблюдаются тенденции ее дальнейшего ускоренного роста [3]. На сегодняшний день главной составляющей антропогенного фактора остается сжигание ископаемого углеводородного топлива, что побуждает правительства стран с развитым уровнем экономиками предпринимать меры по сокращению выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу [4]. Несмотря на то, что любое извержение вулкана среднего масштаба способно свести к нулю все усилия человечества по сокращению влияния на парниковый эффект антропогенного фактора, требования экологических стандартов по эмиссии CO<sub>2</sub> от транспортных энергетических установок продолжают постоянно ужесточаться.

Учитывая то обстоятельство, что судоходная отрасль вносит ощутимо весомый вклад в суммарную эмиссию углекислого газа в мировой воздушный бассейн за счет сжигания ископаемых углеводородных топлив судовыми энергетическими установками, Международная морская организация (ИМО) прилагает постоянные усилия для решения вопроса урегулирования этого аспекта экологической проблемы. Так, в 2013 г. был введен *индекс энергоэффективности* [5] для оценки и сдерживания выбросов CO<sub>2</sub>, а в апреле 2018 г. ИМО приняла новую стратегию сокращения выбросов парниковых газов для судоходства (далее — стратегия ИМО), в соответствии с которой предполагается поэтапное снижение средней интенсивности выбросов диоксида углерода на тонно-милю на 40 % к 2030 г. и на 70 % к 2050 г. Исходя из этого грузоотправители и фрахтователи учитывают

выбросы парниковых газов при выборе поставщиков транспортных услуг. В значительной мере этому способствует Ассоциация принципов Посейдона<sup>1</sup>, деятельность которой направлена на повышение роли финансирования водного транспорта в решении глобальных экологических проблем. Принципы Посейдона<sup>2</sup> разработаны глобальными банками судоходной отрасли: Citi, Societe Generale и DNB в сотрудничестве с ведущими «игроками» отрасли: AP Møller Mærsk, Cargill, Euronav, Gram Car Carriers, Lloyd's Register и Watson Farley & Williams. Члены этой ассоциации взяли на себя ответственность за использование принципов интеграции климатических факторов в решения о кредитовании в соответствии с целями ИМО, связанными с климатом.

Целью статьи является анализ возможных путей сокращения выбросов парниковых газов судами различного назначения для достижения целей генеральной стратегии ИМО.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Тенденции для реализации изначально принятой генеральной стратегии ИМО схематично показаны на рис. 1. Принимая за базу суммарные выбросы парниковых газов, являющиеся следствием деятельности мирового морского судоходства в 2008 г., в качестве временного ориентира достижения перемен установлен 2050 г. Планируется максимально быстро, не позднее 2030 г., сократить интенсивность выбросов на 40 % и затем к 2050 г. — до 70 %, обеспечив тем самым суммарное сокращение выбросов на 50 %. Конечной целью ИМО является в течение минимальных сроков текущего столетия прекратить выбросы ПГ.

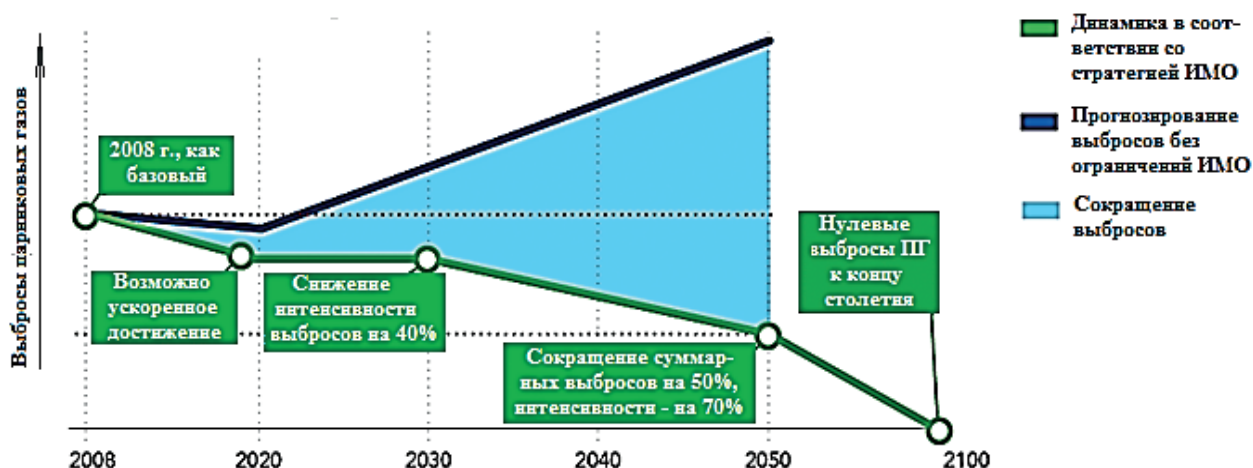


Рис. 1. Схема стратегии ИМО

На рис. 1 прогнозирование выбросов без ограничений ИМО выполнено на основании предполагаемого роста спроса на торговые морские перевозки к 2050 г. на 39 %<sup>3</sup>.

**Способы достижения цели стратегии.** Для определения перспектив сокращения выбросов парниковых газов, в соответствии со стратегией ИМО, необходимо выделить возможные направления совершенствования современного флота<sup>4</sup> [6] и определить потенциал снижения выбросов парниковых газов (рис. 2).

<sup>1</sup> Poseidon Principles announces new members of the Steering Committee March 25, 2020 accessed at <https://www.poseidonprinciples.org/news/poseidon-principles-announces-new-members-of-the-steering-committee>.

<sup>2</sup> 15 financial institutions disclose the climate alignment of their ship finance portfolios, 2020, p.4, [Электронный ресурс] <https://www.poseidonprinciples.org/news/15-financial-institutions-disclose-the-climate-alignment-of-their-ship-finance-portfolios>.

<sup>3</sup> DNVGL\_2020\_Maritime\_Forecast\_to\_2050\_WEB.pdf

<sup>4</sup> “Final Report — Framework CO2 reduction in Shipping”, Maritime Knowledge Centre, TNO & TU Delft, 2017. P. 41, accessed at <https://www.koersenvaart.nl/files/Framework%20CO2%20reduction%20in%20shipping.pdf>.



Рис 2. Пути снижения выбросов парниковых газов

Достижению целей новой стратегии ИМО должно способствовать комплексное решение ряда проблем традиционного и инновационного плана. Как следует из рис. 2, получение желаемых результатов предполагает решение следующих вопросов:

- совершенствование логистического обеспечения перевозок;
- дальнейшее решение проблем гидродинамики судна;
- улучшение характеристик энергогенерирующего оборудования и агрегатов систем судовой энергетической установки (СЭУ);
- замена используемых ископаемых видов топлива на альтернативные источники энергии.

Исходя из того, что объемы выбросов парниковых газов напрямую зависят от количества использованного углеводородного топлива, поиск путей повышения топливной экономичности энергетических установок и снижения потребляемых мощностей остается эффективным направлением достижения сокращения выбросов.

Логистическое обеспечение перевозок традиционно относится к одному из действенных способов сокращения энергопотребления. На первом плане мероприятий по сокращению выбросов CO<sub>2</sub> оказывается оптимизация скорости перевозки. Это обусловлено тем, что необходимая мощность, а, следовательно, и расход топлива главной энергетической установкой имеют кубическую зависимость от скорости движения судна. Исходя из этого необоснованно высокие скорости передвижения судна при прочих равных условиях способны существенно повысить уровень выбросов парниковых газов. Кроме того, на сокращение суммарных выбросов парниковых газов может оказывать влияние оптимизация загрузки судна и сведение к минимуму передвижений в балласте. Сокращение дальности перевозок путем выбора альтернативных маршрутов может также являться действенным способом уменьшения выбросов ПГ. Таким образом, считается, что тщательная проработка логистических аспектов проблемы способна обеспечить сокращение выбросов ПГ в воздушный бассейн более чем на 20 %.

Ввиду всесторонней теоретической и экспериментальной проработки вопросов совершенствования гидродинамики судов и повышения эффективности работы СЭУ, эти аспекты проблемы имеют наиболее низкий потенциал среди путей сокращения выбросов ПГ. Однако их возможности в настоящее время не следует считать исчерпанными.

Совершенствование гидродинамических характеристик современных судов имеет несколько направлений. Наряду с дальнейшим совершенствованием формообразования корпуса судна как главного направления данного аспекта необходимо рассматривать возможность снижения сопротивления движению за счет разработки и использования специальных покрытий корпуса и других технических решений (например, аэродинамической смазки и т. д.). Тем не менее ожидаемый эффект от этих мероприятий, по некоторым оценкам, не превысит 15 % снижения интенсивности выбросов диоксида углерода.



Повышение эффективности работы СЭУ как способ достижения целей стратегии ИМО следует рассматривать в основном в двух направлениях. Во-первых, это повышение топливной экономичности энергогенерирующих агрегатов, включая главные двигатели, обеспечивающие движение судна, вспомогательные двигатели и вспомогательные котельные установки. Во-вторых, совершенствование и повышение эффективности работы агрегатов — комплектующих систем обеспечения СЭУ и общесудовых систем, а также рациональное их использование в плане снижения суммарного энергопотребления.

В основном потенциал этого способа достижения целей новой стратегии ИМО может быть реализован за счет развития второго направления, поскольку эффективный коэффициент полезного действия современных двигателей внутреннего сгорания достигает до 50 %, что близко к его теоретическому пределу. Одновременно следует отметить, что высшие показатели топливной экономичности достигаются в двухтактных малооборотных двигателях, которые устанавливаются на крупных (дедвейтом более 85 000 т, составляющих 6 % от флота) и средних судах (свыше 45 000 т — 13 % от флота). Выбросы парниковых газов от крупных (30 % от общего объема выбросов CO<sub>2</sub>) и средних судов суммарно обеспечивают половину выбросов, как показано на рис. 3. При этом на все суда свыше 15 000 т (30 % флота) приходится 80 % выбросов.

При рассмотрении данного направления нельзя упускать из вида использование новых технологий, которые находятся в стадии апробации и не получили пока широкого распространения. В первую очередь это относится к судам с энергетическими установками на основе топливных элементов, гибридным и аккумуляторным (батарейным) судам. При этом необходимо отдельно отметить, что последние не будут вносить вклад в суммарные выбросы только в том случае, если электроэнергия для зарядки будет генерироваться без сжигания ископаемых углеводородных топлив (солнечные элементы, ветрогенераторы, гидроэлектростанции и т. д.), поскольку в противном случае выбросы ПГ будут существенно увеличены по сравнению со сжиганием топлива непосредственно в камере сгорания тепловых двигателей за счет дополнительных потерь, связанных с передачей электроэнергии, потерь в зарядных устройствах, аккумуляторах, электродвигателях и т. д.

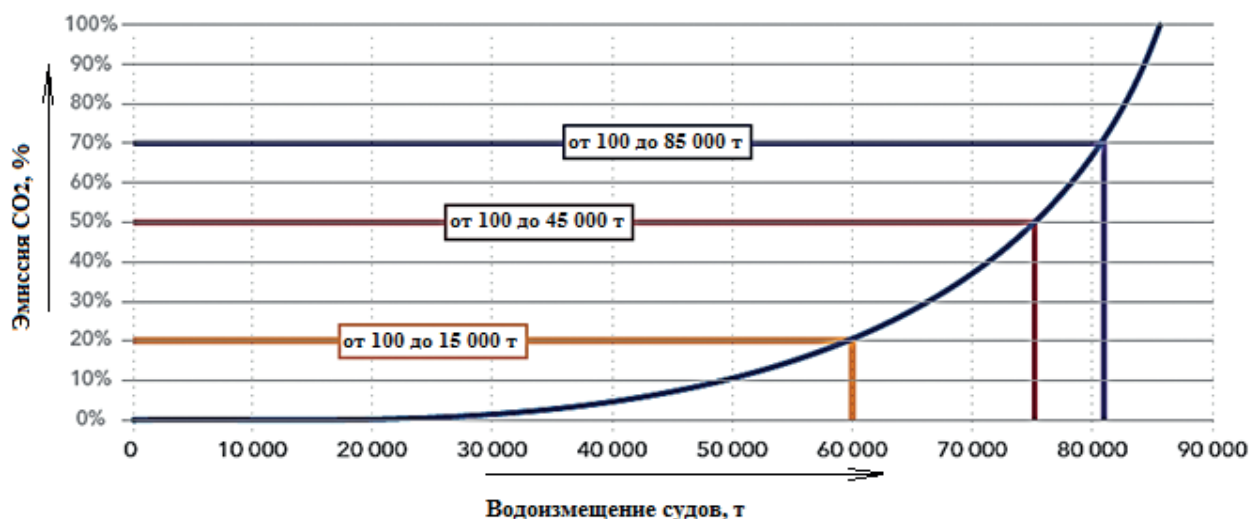


Рис. 3. Выбросы углекислого газа в зависимости от размера судна

На аккумуляторном судне энергетическая система для главных силовых установок и вспомогательных агрегатов основана на аккумуляторных батареях, заряженных от береговой электрической сети во время стоянки. Если электричество поступает из возобновляемых источников энергии, то можно считать, что полностью электрическое судно не выделяет CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, твердые частицы и SO<sub>x</sub>. Одновременно, в зависимости от конструкции движителя, такие суда также могут ограничить физические поля снижением шума двигателя.

Гибридная энергетическая установка судна имеет электроаккумуляторы, которые можно заряжать с помощью энергии от берега, а также двигатели с бортовыми обычными запасами топлива, которые можно использовать для зарядки аккумуляторов. Судно может работать только от аккумуляторных батарей на определенных участках маршрута (например, при маневрировании в порту или в режиме ожидания). Оно также может использовать аккумуляторы и полностью выполнять свои функции на запасенной электроэнергии во время основных режимов работы, а тепловые двигатели задействовать только для резервного питания или в особых обстоятельствах. Примером служит норвежский паромный сектор, где многие паромы работают почти полностью на электроаккумуляторной основе, при строительстве которых использованы гибридные решения с поршневыми двигателями для резервного использования.

При работе без подпитки от портовой сети аккумуляторная гибридная судовая энергетическая установка использует запасенную энергию аккумуляторных батарей для оптимизации режимов работы двигателя и систем питания, обеспечивая снижение расхода топлива. Таким образом, очевидная выгода использования аккумуляторных гибридных судов, не потребляющих электроэнергию с берега, состоит в значительном потенциале повышении их энергоэффективности. Исходя из ранее изложенного, можно оценить потенциал сокращения выбросов ПГ этого направления в пределах 5–20 %. Вывод: ни один из рассмотренных ранее путей достижения целей стратегии ИМО по сокращению на 70 % выбросов ПГ судовыми энергетическими установками к 2050 г. не обеспечивает удовлетворения выдвигаемых требований даже при комплексном подходе. Поэтому основные ожидания и наибольшее внимание связывают с наиболее перспективным направлением, а именно использованием специальных топлив, которые в случае декарбонизации топлива способны обеспечить снижение выбросов диоксида углерода практически до нулевого уровня. Рассмотрим более подробно эту проблему, представляющую наибольший интерес.

**Использование альтернативных видов топлива как основной способ достижения целей стратегии ИМО.** Использование традиционных ископаемых сортов топлива для судовых энергетических установок, согласно стратегии ИМО, представляется бесперспективным направлением развития современного флота. Исследования, проведенные DNV GL–Maritime Forecast to 2050<sup>1,2</sup> [7]–[9], показывают, что достижение целей ИМО возможно, но требует принятия специальных конструктивных решений, способствующих разработке и внедрению альтернативных видов топлива. По прогнозам DNV GL, спрос на морскую торговлю вырастет на 39 % в период 2018–2050 гг. Благодаря мерам по повышению энергоэффективности, связанным в основном с улучшением корпуса и оборудования, а также снижением скорости, к 2050 г. ожидается снижение потребления энергии на тонно-милю в среднем на 35–40 % по всем прогнозируемым направлениям. Прогнозируемая динамика до 2050 г. структуры энергопотребления топлив приведена на рис. 4.

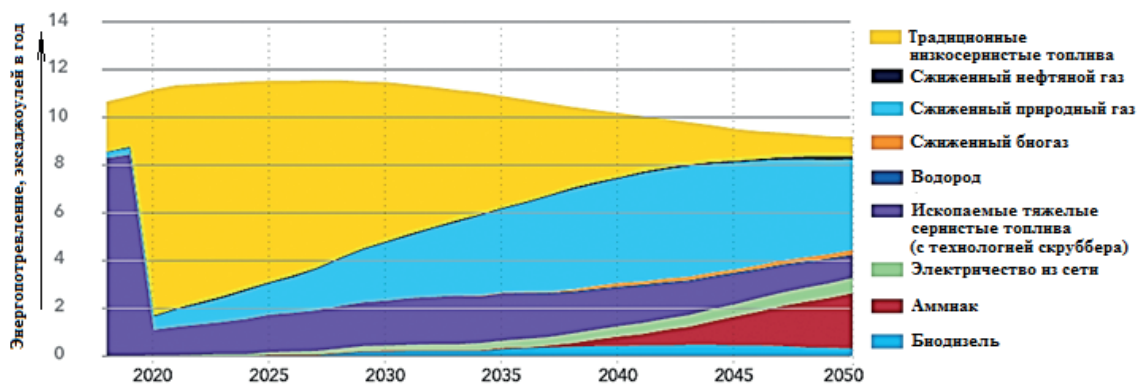


Рис 4. Динамика потребления топлив до 2050 г. в тепловом эквиваленте

<sup>1</sup> Energy Transition Outlook 2018: Maritime forecast to 2050, DNV GL, 2018, [Электронный ресурс] <https://eto.dnvgl.com>.

<sup>2</sup> Decarbonising Maritime Transport. Pathways to zero-carbon shipping by 2035. Free download of the report “De-carbonising Maritime Transport: Pathways to zero carbon-shipment by 2035, 2018, page 86, [Электронный ресурс] <https://www.itf-oecd.org/decarbonising-maritime-transport>.

Учитывая ранее изложенное, следует ожидать, что общее энергопотребление отраслью постепенно будет иметь тенденцию к сокращению с 11,5 до 9 эДж/с в год к 2050 г. несмотря на прогнозируемый рост перевозок. С 2020 г. ИМО введено глобальное ограничение по содержанию серы в топливе [10], что вызвало резкое сокращение потребления традиционного сернистого топлива мировой судоходной отраслью. Многие операторы судов перешли к применению низкосернистых сортов топлива, что обусловило резкое увеличение его расходования. Предполагается, что потребление ископаемых тяжелых видов топлива будет неуклонно сокращаться, однако полного отказа от их использования к 2050 г. не предвидится. При условии очистки отработавших газов в скрубберных системах использование ископаемых тяжелых сернистых остаточных топлив будет продолжаться до 2050 г., предполагаемая их доля в общем энергетическом балансе вряд ли превысит 10–12 %, так же, как и видов топлива с низким содержанием серы (например, судового дизельного топлива, морского газойля и др.).

Сокращение использования ископаемых жидких топлив в числе составляющих энергетического топливного баланса на начальном этапе развития концепции ИМО предполагается за счет увеличения доли использования, в первую очередь, сжиженного природного газа (СПГ)<sup>1</sup> [11]–[13].

*Сжиженный природный газ* рассматривается как перспективный вид топлива для глобальных перевозок, поскольку он имеет потенциал для сокращения вредных выбросов в атмосферу и конкурентоспособную цену по сравнению с жидким морским топливом. Это способствует реализации четырех основных концепций газовых двигателей. В таблице (с. 737) приведены их обобщенные основные технические характеристики, включая потенциал сокращения выбросов, дополнительные расходы по инвестициям в сравнении с морским дизельным / газойльным топливом и др.

При исследовании проблем использования СПГ необходимо иметь в виду, что этот вид топлива является ископаемым, и его сжигание неизбежно будет приводить к увеличению содержания парниковых газов в атмосфере, хотя и в меньшей мере, чем при сжигании жидких ископаемых топлив. В этой связи несмотря на высокую привлекательность СПГ как топлива для морских перевозок, доля его использования в структуре баланса (рис. 4) предполагает некоторое снижение к 2050 г.

Развитие технологий СПГ является переходным этапом для использования других видов топлив, которые будут углерод-нейтральными. К ним относятся топлива, сжигание которых не приводит к попаданию в атмосферу большего количества CO<sub>2</sub>, чем это было бы в естественном круговороте углерода в природе. При этом энергетика и использование ресурсов Земли для производства такого топлива также должны быть нейтральными по отношению к выбросам углерода.

*Углерод-нейтральные топлива* — это топлива<sup>2</sup>, в основе производства которых находятся возобновляемые ресурсы. К ним относятся биотопливо и синтетическое топливо (электротопливо).

*Устойчивое биотопливо* — это гибкая альтернатива ископаемых видов топлива. Их можно смешивать с обычными видами топлива или использовать в качестве заменителей, полностью заменяя традиционные виды ископаемых топлив. Биотопливо можно использовать непосредственно в существующих установках без значительных технических изменений. Поэтому оно может в настоящее время оптимально использоваться на флоте для замены топлива на нефтяной основе.

Наиболее перспективным видом биотоплива для судов являются биодизель и сжиженный биогаз, состоящий в основном из метана. Некоторые примеры биотоплива включают альтернативное топливо HVO (гидрогенизированное растительное масло); VTL (биомасса в жидкости) и FAME (метиловый эфир жирной кислоты). FAME не является капельным топливом, так как допустимая концентрация при смешивании для него ограничена 7 % по Международному стандарту ISO 8217: 2017. Биодизель наиболее подходит для замены морского дизельного топлива и морского газойля при соблюдении ограничения его агрессивного влияния на системы двигателя. Сжиженный биогаз может являться непосредственной заменой сжиженного природного газа в качестве судового топлива с использованием существующей и создаваемой инфраструктуры СПГ.

<sup>1</sup> Malins C. Crude oil greenhouse gas emissions calculation methodology for the Fuel Quality Directive / C. Malins, S. Galarza, A. Baral, G. Howorth, A. Brandt // Report by the international Council on Clean Transportation to the European Commission Directorate-General for Climate Action. International Council on Clean Transportation (ICCT), 2014, page 162. [https://ec.europa.eu/clima/sites/default/files/transport/fuel/docs/icct\\_crude\\_ghg\\_calculation\\_methodology\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/default/files/transport/fuel/docs/icct_crude_ghg_calculation_methodology_en.pdf).

<sup>2</sup> LPG for Marine Engines - The Marine Alternative Fuel', p. 144, <https://www.wlpga.org/wp-content/uploads/2018/02/LPG-for-Marine-Engines-2017-.pdf>.

**Основные характеристики четырех концепций газового двигателя**

Тип двигателя	Газовый 4-тактный низкого давления	Двухтопливный 4-тактный низкого давления	Двухтопливный 2-тактный низкого давления	Двухтопливный 2-тактный высокого давления
Типичная область применения	Небольшие суда «короткого моря»		Крупные морские суда «глубокого моря»	
	Диапазон мощности, МВт	0,5–10	1–18	2,5–90
Частота вращения коленчатого вала	Средне- и высокооборотные	Среднеоборотные	Малооборотные	
Способ смесеобразования	Внешнее смесеобразование, цикл Отто			
Используемое давление газа	4–6 бар			
Термический КПД	42–49 %	40–45 %	< 16 бар	> 300 бар
Проблемы в работе, риски	Проскальзывание метана на выпуск, детонация, необходимость резервного топлива	Проскальзывание метана на выпуск, детонация	Проскальзывание метана на выпуск, детонация, капильное зажигание	Возможное сжижение газа под высоким давлением
	Сокращение выбросов парниковых газов	5–15 %	0–10 %	20–24 %
Оксиды азота	85–90 %	75–90 %	(необходимо каталитическое восстановление или рециркуляция отработавших газов)	
	Оксиды серы	> 98 %	> 98 %	92–97 %
Твердые частицы	> 99 %	95–98 %		
	Дополнительные инвестиции в строительстве			
Ископаемые топлива	СПГ		СПГ + тяжелое топливо или морской газойль	
	Сжиженный биогаз			
Неископаемые виды топлив	Синтетический метан (электротопливо)			
	Биодизель			
Используемое топливо	Синтетическое жидкое топливо (электротопливо)			



В настоящее время биотопливо начинает получать распространение на рынке. Использование биотоплива в судоходстве ограничено, но реализация нескольких демонстрационных проектов выдержала проверку технической осуществимости технологий различных видов биотоплива. Альтернативное топливо HVO в настоящее время используется на нескольких паромах<sup>1</sup>, работающих в Норвегии. Кроме того, представителями норвежского прибрежного пассажирского флота Hurtigruten был подписан контракт с базирующейся в Тронхейме компанией Biokraft на поставку биогаза в период 2020–2027 гг. Последние разработки в области двигателестроения также позволили использовать двухтопливные двигатели, которые могут сжигать этанол, что увеличивает потенциал потребления биотоплива. Возможности использования в качестве топлива метанола<sup>2, 3</sup> демонстрируют четырехтактные двигатели Wärtsilä, работающие на пассажирском пароме Stena Germanica. Аналогичные двигатели установлены на семи танкерах-химовозах (перевозчиках метанола). Необходимо отметить, что несмотря на то, что метанол сегодня доступен в больших объемах, не хватает глобальной инфраструктуры и бункеровочных мощностей для судоходства. Распределять метанол по судам можно с помощью грузового или бункерного судна. Stena Line создала специальную зону в шведском порту Гетеборг для бункеровки судна Stena Germanica.

Метанол можно производить с использованием возобновляемого сырья, такого как бытовые и промышленные отходы, биомасса вместе с CO<sub>2</sub> и водородом, но в настоящее время метанол обычно производится путем синтеза с использованием природного газа в качестве сырья. Такие топлива называют *синтетическими*, или *электротопливами*. Первая коммерческая электростанция по производству метанола была построена в Исландии в 2012 г., мощность производства которой составляет более 5 млн л электрометанола в год. Исландия производит электрометанол с использованием геотермальной энергии и CO<sub>2</sub> из одного и того же источника.

*Электротопливо* является превосходным переходным топливом. Преимуществом электротоплив на основе углерода является то, что они, как и обычные виды топлива, могут иметь высокую плотность энергии. Синтетическое топливо нуждается в таком же хранении на борту, как и используемое обычное. Несмотря на то, что электротопливо обладает потенциальными преимуществами, его производство в настоящее время является дорогостоящим и энергоемким. Так, прямая подача электроэнергии для питания аккумуляторных судов приводит к тому, что 73 % произведенной электроэнергии предоставляется в качестве энергии для использования в энергетической установке. В отличие от этого показатель для электротоплива составляет всего 13 %, что означает, что 87 % энергии расходуется впустую. Низкая эффективность в конечном итоге оказывает влияние на стоимость топлива. Следовательно, фактическое ценообразование в значительной степени зависит от цены на электроэнергию. Однако, если стоимость производства электроэнергии оказывается достаточно низкой, большие потери эффективности с использованием электротоплива становятся менее актуальными. Ожидается, что снижение цены на возобновляемые источники энергии в целом сделают несколько видов топлива с нейтральным уровнем выбросов углерода более конкурентоспособными. Предполагается, что по мере приближения к 2050 г., морская отрасль будет характеризоваться растущим разнообразием выбора топлива. Большие ожидания по снижению выбросов парниковых газов ИМО связывает с декарбонизацией топливно-энергетической структуры и повышением роли безуглеродных видов топлива.

*Безуглеродное топливо* представляется перспективным энергоносителем для достижения целей стратегии ИМО по сокращению выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу. Наиболее известным из безуглеродных видов топлива является водород (H<sub>2</sub>), получаемый из возобновляемых источников и углерод-

<sup>1</sup> <https://www.dnvgl.com/oilgas/contact/explenergy-2019-register-user.html>.

<sup>2</sup> Malins C. Understanding the greenhouse gas implications of diverting waste and residual materials to biofuel production / C. Malins // Cerulogy and the International Council on Clean Transportation, 2017, page 146. <https://theicct.org/publications/waste-not-want-not-understanding-greenhouse-gas-implications-diverting-waste-and>.

<sup>3</sup> Methanol as marine fuel: Environmental benefits, technology readiness, and economic feasibility. IMO, 2016, p. 50 <https://www.imo.org/en/About/Pages/press.aspx?ID=11111>.

но-нейтральных энергетических ресурсов, таких как электричество. Следует признать, что водород на сегодняшний день представляется наиболее экологичным видом топлива. Однако многочисленные попытки использования его в качестве основного топлива или присадок для поршневых двигателей внутреннего сгорания связаны с многочисленными препятствиями. Эти препятствия обусловлены наличием следующих факторов: высокие инвестиционные затраты; зрелость водорода в качестве топлива; его доступность и цена; требуемое пространство для хранения и обеспечение требований безопасности. Вместе с тем использование сжатого или сжиженного водорода в морских топливных элементах является реалистичным вариантом для короткого морского сегмента перевозок в среднесрочной перспективе.

Водород сам по себе может служить основой для различных видов топлива (рис. 5). Используя возобновляемую электроэнергию, из водорода могут быть получены синтетические виды топлива как на основе углерода: метан, метанол и другие вещества, когда они производятся из  $H_2$  и  $CO_2$ , так и на основе азота (например, аммиак<sup>1</sup>). Полученное из водорода [14] синтетическое углеводородное топливо может служить заменой ископаемых топлив, с минимальной модификацией двигателей и топливных систем.

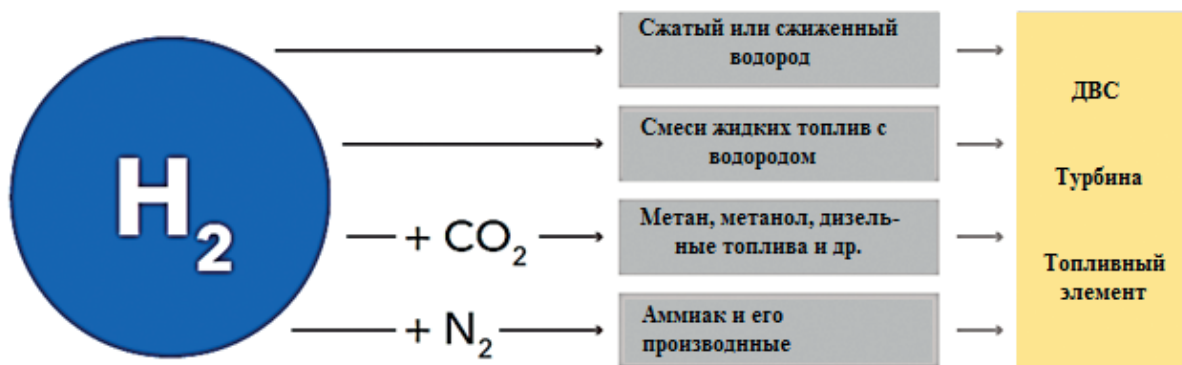


Рис. 5. Перспективы использования водорода

Проблемы, связанные с безопасностью и регулированием, а также с занимаемым пространством и стоимостью хранения большого количества  $H_2$  на судах, вызвали интерес к изучению альтернативных безуглеродных энергоносителей на основе водорода<sup>2</sup>. Некоторые исследования [15] указывают на то, что аммиак ( $NH_3$ ) является потенциальным топливом для судоходства. Однако в настоящее время на рынке нет ни одного морского двигателя, способного работать на аммиаке. При этом наибольшие перспективы стратегии ИМО связаны именно с использованием аммиака (см. рис. 4). Аммиак как топливо обладает следующими существенными недостатками: очень высокая температура самовоспламенения, низкая скорость распространения пламени, высокая теплота испарения, узкие пределы воспламеняемости, токсичность, потенциальный рост эмиссии  $NO_x$  и высокая агрессивность к целому ряду традиционных конструкционных материалов. Однако ведущие производители двигателей заняты разработкой конструкций, способных работать на аммиаке. Ожидается, что опытные образцы будут готовы в течение следующих нескольких лет (ориентировочно к 2025 г.).

Аммиак может быть произведен из возобновляемых источников с использованием электролиза. Необходимо отметить, что аммиак находит широкое применение в промышленности и сельском хозяйстве. По этой причине существующая наземная инфраструктура для транспортировки и обработки  $NH_3$  достаточно хорошо развита. Однако для использования аммиака в качестве судового топлива необходимы бункеровочная инфраструктура и бортовые преобразователи для подачи

<sup>1</sup> Reiter A. Combustion and emissions characteristics of a compression-ignition engine using dual ammonia-diesel fuel / A. Reiter (2009). Graduate Theses and Dissertations. 10560. [Электронный ресурс] <https://lib.dr.iastate.edu/etd/10560>.

<sup>2</sup> Hydrogen: towards net-zero emissions, [Электронный ресурс] <https://www.shell.com/energy-and-innovation/new-energies/hydrogen.html>

в двигатель, которые пока недоступны на рынке. Следует отметить, что судно, работающее на сжиженном нефтяном газе в качестве топлива, в будущем может быть относительно легко переоборудовано для работы на аммиаке, а это означает, что подобные энергетические установки могут быть потенциально реализованы в будущем.

В процессе рассмотрения некоторых аспектов проблемы сокращения выбросов парниковых газов судовыми энергетическими установками необходимо отметить, что принятие политических и технологических решений, направленных на достижение целей стратегии ИМО в части использования большинства альтернативных видов топлива и источников энергии, будет существенно различаться для разных типов судов и рода их деятельности, определяя техническую применимость и коммерческую жизнеспособность.

Глубоководное судоходство включает большие океанские суда, большая часть энергопотребления которых связана с движением судна с постоянной расчетной скоростью на большие расстояния. Эти суда сегодня приводятся в движение механическими двухтактными двигателями с прямым или редукторным приводом, которые обладают для этой цели высокой энергоэффективностью. Судам требуется топливо, доступное по всему миру, а его энергоемкость крайне важна для оптимизации пространства, доступного для перевозки груза на большие расстояния. Следует ожидать, что суда этого класса будут сохранять традиционные принципы организации работы пропульсивного комплекса в обозримом будущем.

Суда в сегменте «короткого моря» (фидерные, каботажные, трамповые, морские линейные, паромы и др.), как правило, имеют меньшие размеры, отличаются большим разнообразием рабочих профилей, значительная часть их времени и энергии расходуется на цели, отличные от работы на номинальных режимах (рис. 6).

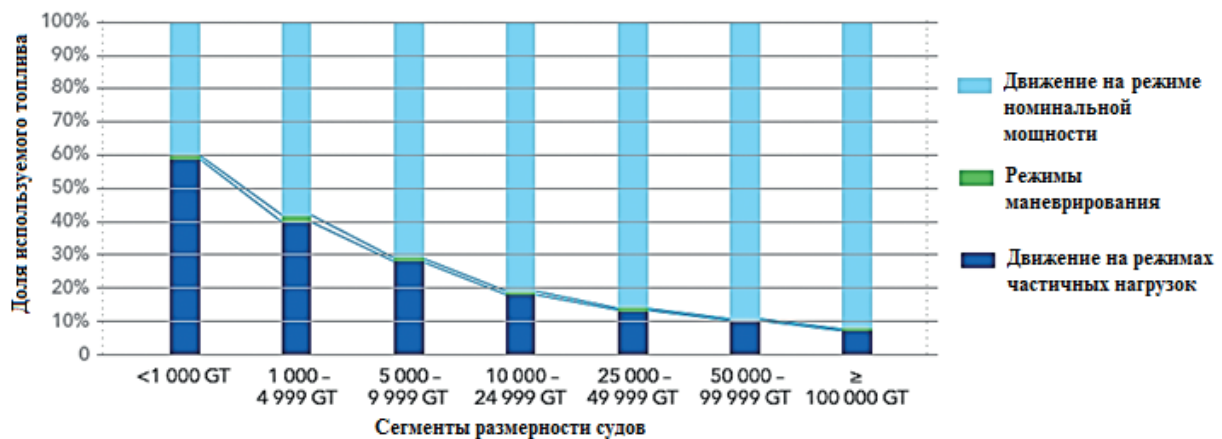


Рис. 6. Доли используемого топлива на режимах работы в зависимости от размера судна

Для этих судов более короткие расстояния и сильно изменяющиеся требования к мощности часто делают электрическую аккумуляторную или гибридную электрическую двигательную установку более эффективной, чем традиционные механические приводы. Наличие системы перераспределения электроэнергии обеспечивает более эффективное энергопотребление в широком диапазоне профилей нагрузки энергетической установки таких судов. Это также повышает гибкость использования энергии от батарей, топливных элементов и отработанного тепла, а также возобновляемых источников (например, солнечного света, ветра, волн). Таким образом, суда данного класса можно рассматривать как платформу для отработки возможных перспективных технических решений, направленных на достижение главных целей стратегии ИМО по сокращению выбросов парниковых газов.

## Выводы (Findings)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Достижение целей принятой стратегии ИМО по поэтапному снижению средней интенсивности выбросов диоксида углерода на тонно-миллион на 70 % к 2050 г., требует принятия ряда политических и технических решений, направленных на совершенствование логистического обеспечения судоходства, повышение энергоэффективности судов и внедрение альтернативных углерод-нейтральных видов топлива и установок.

2. Для достижения целей стратегии ИМО по снижению интенсивности выбросов ПГ выделяются четыре основных направления совершенствования современного флота:

- совершенствование логистического обеспечения перевозок;
- дальнейшее повышение качества гидродинамических параметров судна;
- улучшение характеристик энергогенерирующего оборудования и агрегатов систем судовой энергетической установки;
- замена используемых ископаемых видов топлива на альтернативные, потенциально способные при комплексном подходе обеспечить выполнение поставленных стратегией задач.

3. Среди основных направлений совершенствования флота в плане достижения целей стратегии ИМО по сокращению выбросов парниковых газов особое значение приобретает использование альтернативных видов топлива как направление, способное обеспечить до 100 % сокращения выбросов парниковых газов.

4. В краткосрочной перспективе достижения запланированных целей стратегии ИМО по сокращению эмиссии диоксида углерода может быть рассмотрен перевод судовых энергетических установок на работу на сжиженном природном газе. Такой подход позволит добиться до 24 % сокращения выбросов парниковых газов, а также подготовить базу для перехода к использованию углерод-нейтрального биогаза или других видов синтетического газообразного топлива.

5. Большие ожидания в долгосрочной перспективе рассматриваемой концепции ИМО связаны с использованием безуглеродных видов топлива, среди которых главное место отводится аммиаку. Несмотря на ряд недостатков, NH<sub>3</sub> оказывается весьма привлекательным альтернативным топливом, в перспективе способным потенциально обеспечить полную декарбонизацию будущего флота.

6. Применимость методов снижения выбросов парниковых газов будет зависеть от типов судов, составляющих различные сегменты мирового флота. Наиболее гибкая адаптация к прогрессивным техническим решениям прогнозируется для судов «короткого моря», в то время как глубоководный сегмент предполагает наибольший консерватизм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Santer B. D.* Celebrating the anniversary of three key events in climate change science / B. D. Santer, C. J. W. Bonfils, Q. Fu, J. C. Fyfe, G. C. Hegerl, C. Mears, J. F. Painter, S. Po-Chedley, F. J. Wentz, M. D. Zelinka, C.-Z. Zou // *Nature Climate Change*. — 2019. — Vol. 9. — Is. 3. — Pp. 180–182. DOI: 10.1038/s41558–019–0424-x.

2. *Ramanathan V.* Global and regional climate changes due to black carbon / V. Ramanathan, G. Carmichael // *Nature geoscience*. — 2008. — Vol. 1. — Is. 4. — Pp. 221–227. DOI: 10.1038/ngeo156.

3. *Kiehl J. T.* Earth's annual global mean energy budget / J. T. Kiehl, K. E. Trenberth // *Bulletin of the American meteorological society*. — 1997. — Vol. 78. — Is. 2. — Pp. 197–208. DOI: 10.1175/1520–0477(1997)078<0197: EAGMEB>2.0.CO;2.

4. *Юлкин М. А.* Низкоуглеродное развитие: от теории к практике / М. А. Юлкин. — М.: АНО «Центр экологических инвестиций», 2018. — 80 с.

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



6. Serra P. Towards the IMO's GHG goals: A critical overview of the perspectives and challenges of the main options for decarbonizing international shipping / P. Serra, G. Fancello // *Sustainability*. — 2020. — Vol. 12. — Is. 8. — Pp. 3220. DOI: 10.3390/su12083220.

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

8. Латухов С. В. Проблемы экологической безопасности судоходства: монография / С. В. Латухов [и др.]. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 160 с.

9. Trozzi C. Emission Estimate Methodology for Maritime Navigation / C. Trozzi // 9th International Emissions Inventory Conference. — 2010 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/conference/ei19/session10/trozzi.pdf> (дата обращения: 01.07.2021).

10. Живлюк Г. Е. Экологическая безопасность судовых ДВС. Выбор эффективного способа соответствия новым требованиям 2020 г. по выбросам серы / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 727–744. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-727-744.

11. Brynolf S. Environmental assessment of marine fuels: liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol / S. Brynolf, E. Fridell, K. Andersson // *Journal of cleaner production*. — 2014. — Vol. 74. — Pp. 86–95. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.03.052.

12. Le Fevre C. N. A review of demand prospects for LNG as a marine fuel: Working paper / C. N. Le Fevre. — Oxford Institute for Energy Studies, 2018. — 35 p. DOI: 10.26889/9781784671143.

13. AEsøy V. LNG-Fuelled Engines and Fuel Systems for Medium-Speed Engines in Maritime Applications / V. AEsøy, P. M. Einang, D. Stenersen, E. Hennie, I. Valberg // *SAE Technical Paper*. — 2011. — № 2011-01-1998. DOI: 10.4271/2011-01-1998.

14. Захаров Е. А. Улучшение топливной экономичности и экологических показателей роторно-поршневых двигателей: монография / Е. А. Захаров, Ю. В. Левин, Е. А. Федянов, С. Н. Шумский. — Волгоград: ВолГТУ, 2020. — 152 с.

15. Климентьев А. Ю. Аммиак — перспективное моторное топливо для безуглеродной экономики / А. Ю. Климентьев, А. А. Климентьева // *Транспорт на альтернативном топливе*. — 2017. — № 3 (57). — С. 32–44.

## REFERENCES

1. Santer, Benjamin D., Céline J. W. Bonfils, Qiang Fu, John C. Fyfe, Gabriele C. Hegerl, Carl Mears, Jeffrey F. Painter, Stephen Po-Chedley, Frank J. Wentz, Mark D. Zelinka, and Cheng-Zhi Zou. “Celebrating the anniversary of three key events in climate change science.” *Nature Climate Change* 9.3 (2019): 180–182. DOI: 10.1038/s41558-019-0424-x.

2. Ramanathan, Veerabhadran, and Gregory Carmichael. “Global and regional climate changes due to black carbon.” *Nature geoscience* 1.4 (2008): 221–227. DOI: 10.1038/ngeo156.

3. Kiehl, Jeffrey T., and Kevin E. Trenberth. “Earth’s annual global mean energy budget.” *Bulletin of the American meteorological society* 78.2 (1997): 197–208. DOI: 10.1175/1520-0477(1997)078<0197: EAGMEB>2.0.CO;2.

4. Yulkin, M. A. *Nizkouglerodnoe razvitie: ot teorii k praktike*. М. АНО «Tsentr ekologicheskikh investitsii», 2018.

5. Ivanchenko, A. A., A. P. Petrov, and G. E. Zhivljuk. “Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.

6. Serra, Patrizia, and Gianfranco Fancello. “Towards the IMO’s GHG goals: A critical overview of the perspectives and challenges of the main options for decarbonizing international shipping.” *Sustainability* 12.8 (2020): 3220. DOI: 10.3390/su12083220.

7. Lindstad, Elizabeth, and Torstein Ingebrigtsen Bø. “Potential power setups, fuels and hull designs capable of satisfying future EEDI requirements.” *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 63 (2018): 276–290. DOI: 10.1016/j.trd.2018.06.001.

8. Latukhov, S. V., V. A. Nikitin, V. N. Okunev, O. V. Solyakov, and P. G. Khimich. *Problemy ekologicheskoi bezopasnosti sudokhodstva: monografiya*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2015.

9. Trozzi, Carlo. “Emission Estimate Methodology for Maritime Navigation.” *9th International Emissions Inventory Conference*. 2010. Web. 1 July, 2021 <<https://www3.epa.gov/ttnchie1/conference/ei19/session10/trozzi.pdf>>.

10. Petrov, Aleksandr P., and Grigorij E. Zhivljuk. "Ecological safety of ship internal combustion engines. Selecting the efficient method for compliance with the new requirements of 2020 for sulfur emissions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 727–744. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-727-744.

11. Brynolf, Selma, Erik Fridell, and Karin Andersson. "Environmental assessment of marine fuels: liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol." *Journal of cleaner production* 74 (2014): 86–95. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.03.052.

12. Le Fevre, Chris N. *A review of demand prospects for LNG as a marine fuel: Working paper*. Oxford Institute for Energy Studies, 2018. DOI: 10.26889/9781784671143.

13. AEsoy, V., P. M. Einang, D. Stenersen, E. Hennie, and I. Valberg. "LNG-Fuelled Engines and Fuel Systems for Medium-Speed Engines in Maritime Applications." *SAE Technical Paper*. 2011. № 2011–01–1998. DOI: 10.4271/2011-01-1998.

14. Zakharov, E. A., Yu. V. Levin, E. A. Fedyanov, and S. N. Shumskii. *Uluchshenie toplivnoi ekonomichnosti i ekologicheskikh pokazatelei rotorno-porshnevyykh dvigatelei: monografiya*. Volgograd: VolgGTU, 2020.

15. Klymentyev, Alexander, and Alexandra Klymentyeva. "Ammonia as a promising motor fuel for a carbon-free economy." *Alternative Fuel Transport* 3(57) (2017): 32–44.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Статья поступила в редакцию 3 июля 2021 г.

Received: July 3, 2021.