

Научная статья
УДК 621.791.05
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-2-89-95>
EDN MALSLU

Транспортная энергоэффективность и экономические принципы организации морского судоходства

**Владислав Михайлович Москаленко, Михаил Анатольевич Москаленко[✉],
Александр Анатольевич Луговец**

*Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,
Владивосток, Россия, asmsh@rambler.ru[✉]*

Аннотация. Рассматриваются современные проблемы обеспечения энергоэффективности и углеродоемкости морских судов с учетом достижения рентабельности рейсов. С января 2023 г. для всех морских конвенционных судов, занятых в международных перевозках, подобные вопросы встают особенно остро, с учетом введения в действие поправок к приложению VI Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ), разработанных в рамках краткосрочной стратегии ИМО до 2030 г. по сокращению выбросов парниковых газов с судов. Проанализирован состав мирового торгового флота по типам судов и дедвейту, проведена оценка работы трампового фрахтового рынка и особенностей достижения оптимальной экономически эксплуатационной скорости судна с учетом эксплуатационно-технических конвенционных ограничений по углеродоемкости. Проанализирована транспортная работа универсального судна Singularity за три последние года с учетом изменения эксплуатационной скорости и уровня фрахтовых ставок. Предложена адекватная математическая модель назначения судну оптимальной средней эксплуатационной скорости по рейтингу углеродоемкости. Предложенные методологические материалы могут быть использованы судоходными компаниями в коммерческой и технической эксплуатации флота путем назначения эксплуатационной скорости при подготовке к рейсу и при проведении корректирующих мероприятий по энергоэффективности для достижения приемлемого уровня рейтингов углеродоемкости морских судов.

Ключевые слова: морское судно, эксплуатационная скорость, энергоэффективность, рейтинг, углеродоемкость, фрахтовые ставки, трамповое судоходство

Для цитирования: Москаленко В. М., Москаленко М. А., Луговец А. А. Транспортная энергоэффективность и экономические принципы организации морского судоходства // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2024. № 2. С. 89–95. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-2-89-95>. EDN MALSLU.

Original article

Transport energy efficiency and economic principles of maritime navigation

Vladislav M. Moskalenko, Mikhail A. Moskalenko[✉], Aleksandr A. Lugovets

*Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy,
Vladivostok, Russia, asmsh@rambler.ru[✉]*

Abstract. Modern problems of ensuring energy efficiency and carbon intensity of marine vessels are considered, taking into account the achievement of profitability of flights. Since January 2023, such issues have been particularly acute for all maritime convention vessels engaged in international transport, taking into account the introduction of amendments to annex VI of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL), developed within the framework of the IMO short-term strategy until 2030 to reduce emissions greenhouse gases from ships. The composition of the world merchant fleet by ship types and deadweight was analyzed, the work of the tram

freight market and the features of achieving optimal economic operational speed of the vessel were evaluated, taking into account operational and technical conventional restrictions on carbon intensity. The transport work of the universal vessel *Singularity* over the past three years has been analyzed, taking into account changes in operational speed and the level of freight rates. An adequate mathematical model has been proposed for assigning an optimal average operating speed to a ship according to a carbon intensity rating. The proposed methodological materials can be used by shipping companies in the commercial and technical operation of the fleet by assigning an operational speed in preparation for the voyage and when carrying out corrective energy efficiency measures to achieve an acceptable level of carbon intensity ratings for marine vessels.

Keywords: sea vessel, operational speed, energy efficiency, rating, carbon intensity, freight rates, tramp shipping

For citation: Moskalenko V. M., Moskalenko M. A., Lugovets A. A. Transport energy efficiency and economic principles of maritime navigation. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies.* 2024;2:89-95. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-2-89-95>. EDN MALSLU.

Введение

Наибольшее количество морского флота, более 70 %, составляют наливные суда и балкеры, контейнерный флот насчитывает порядка 13,34 %. Тем не менее в секторе контейнерного судоходства активно эксплуатируется модель «экономии издержек на эффекте масштаба» и происходит увеличение вместимости судов. Размер крупнейших в мире контейнеровозов увеличился за 10 последних лет с 9 380 до 24 000 TEU. За тот же период объемы контейнерных перевозок также увеличились примерно на 75 %. В среднем размер самого большого судна в каждой стране возрос почти втрое. Таким образом, количество судов повысилось быстрее, чем объемы грузов, которыми они заполнялись. Как подтвердили результаты анализа рынка морского транспорта, основная доля судов – более 80 % – используется в трамповых перевозках. В линейных контейнерных перевозках занято не более 13,1 % флота. Для линейных перевозок характерны дорогостоящие грузы с высокой добавленной стоимостью, которые накапливаются на складах в минимальных объемах, чтобы не замораживать оборотные средства, поэтому здесь определяющими принципами являются расписание портов и скорость доставки. Для трампового судоходства с большими партиями дешевого массового груза требуется уменьшить конечную цену доставки, и скорость для грузополучателя не имеет принципиального значения, т. к. товар накапливается на складах в значительных объемах.

С 01 января 2023 г. для всех конвенционных судов, занятых в международных морских перевозках, становится обязательным расчет достигнутого индекса энергоэффективности существующего судна EEXI и ежегодного эксплуатационного показателя углеродоемкости СII. По результатам работы судов в 2024 г. каждому судну свыше 5 000 регистровых тонн будет присваиваться рейтинг

углеродоемкости по убыванию от А до Е, учитывая необходимость корректирующих действий для низких рейтингов и ежегодного ужесточения показателей, ИМО планирует добиться полной углеродной нейтральности для морского флота к 2050 г. Более 98 % флота используют сегодня ископаемое топливо, поэтому комплекс мер по улучшению энергоэффективности начинает выступать в роли определяющих ограничений в достижении эффективных экономических показателей работы флота. Здесь наиболее важным ограничением выступает средняя эксплуатационная скорость судна, от которой зависит потребление топлива и достижение допустимых показателей энергоэффективности для морских судов в эксплуатации.

Материалы и методы исследования

Структура мирового флота представлена на рис. 1 и 2. Дедвейт мирового флота по типам судов сегодня примерно одинаков (рис. 3), поэтому особенности изменения рынка морских перевозок имеют общие тенденции развития (рис. 4):

- в точке А фрахтовые ставки минимальные – рынок отправителя и суда выводятся из эксплуатации или работают на пониженных скоростях;
- в точке В ставки фрахта растут, суда вводятся в эксплуатацию, повышая предложение флота;
- в точке С предложение повышается – рынок судовладельца, выгодно увеличивать рейсооборот за счет увеличения эксплуатационной скорости судов.

Учитывая то обстоятельство, что любое транспортное судно рассматривается судовладельцем как «инструмент для получения прибыли», вопросы выбора оптимальной скорости сегодня тесно сопрягаются с конвенционными эксплуатационно-техническими ограничениями по энергоэффективности судов.



Рис. 1. Структура морского флота [1]

Fig. 1. Structure of the navy [1]



Рис. 2. Структура флота в долях от совокупного дедвейта [1]

Fig. 2. Fleet structure as a share of total deadweight [1]

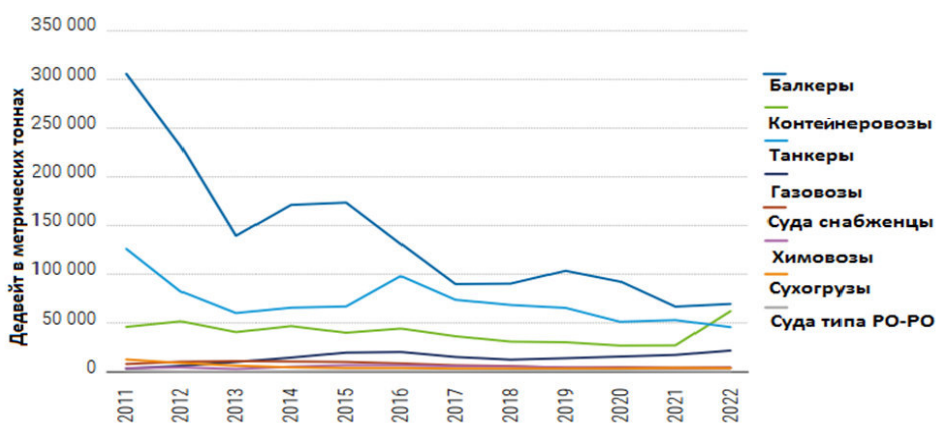


Рис. 3. Дедвейт мирового флота по типам судов [1]

Fig. 3. Deadweight of the world fleet by types of vessels [1]

Москаленко В. М., Москаленко М. А., Луговцев А. А. Транспортная энергоэффективность и экономические принципы организации морского судоходства

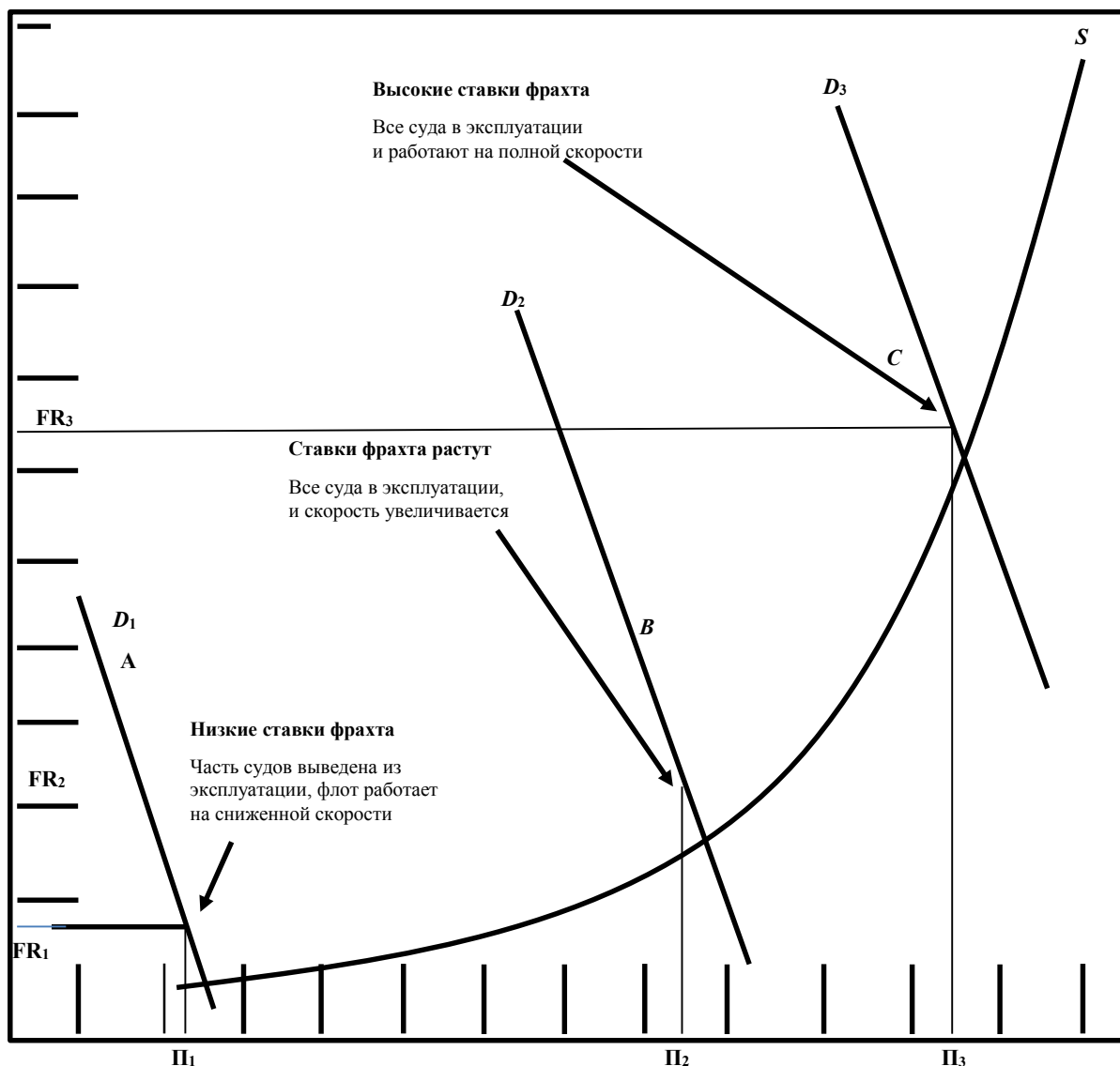


Рис. 4. Особенности изменения рынка морских перевозок:
 D – потребность в тоннаже; П – наличие свободного тоннажа

Fig. 4. Features of the sea transportation market change: D – the need for tonnage; П – availability of free tonnage

Нами была проанализирована рейсовая работа (за последние три года) в тралловом режиме универсального судна *Singularity* дедвейтом 5 тыс. т на переходах из портов российского Дальнего Востока в порты Китая, Японии и Южной Кореи. Основные данные по рейсам отражены на графиках (рис. 5–7), согласно которым при изменении ставки фрахта при всех рассматриваемых скоростях можно перейти порог рентабельности рейса. К сожалению, ставка фрахта меняется в зависимости от предложений рынка. Повышенные ставки фрахта не всегда будут выгодны судоходным компаниям, потому что это будет невыгодно для грузовладельцев и уменьшит объем перевозок. Потребление топлива

зависит от конструкции корпуса и его состояния (в плане обрастания корпуса и винта), размерений и типа судна. Поэтому уровень потребления топлива различен даже у однотипных судов и может различаться на величину порядка 20–30 %. На экономику судов дополнительно оказывает влияние эффект масштаба; например, для судна дедвейтом 120 тыс. т расходы на 1 т дедвейта в 2 раза меньше, чем расходы на судно в 40 тыс. т дедвейтом. Как свидетельствуют результаты анализа, снижение эксплуатационных скоростей оправдано на больших переходах и в условиях роста цен на бункер при фиксированных фрахтовых ставках на низких уровнях.

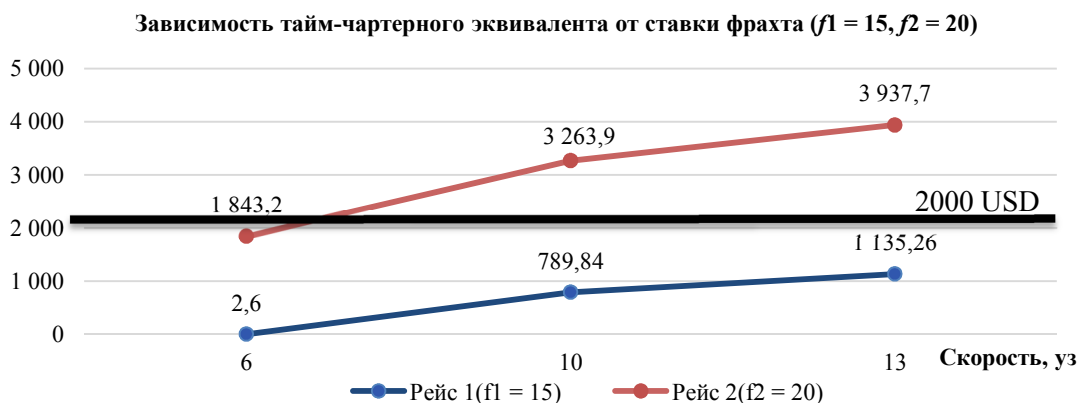


Рис. 5. График зависимости тайм-чартерного эквивалента т/х Singularity от скорости движения и ставки фрахта ($f_1 = 15, f_2 = 20$)

Fig. 5. Graph of dependence of the time charter equivalent of m/v Singularity on the speed of movement and freight rate ($f_1 = 15, f_2 = 20$)

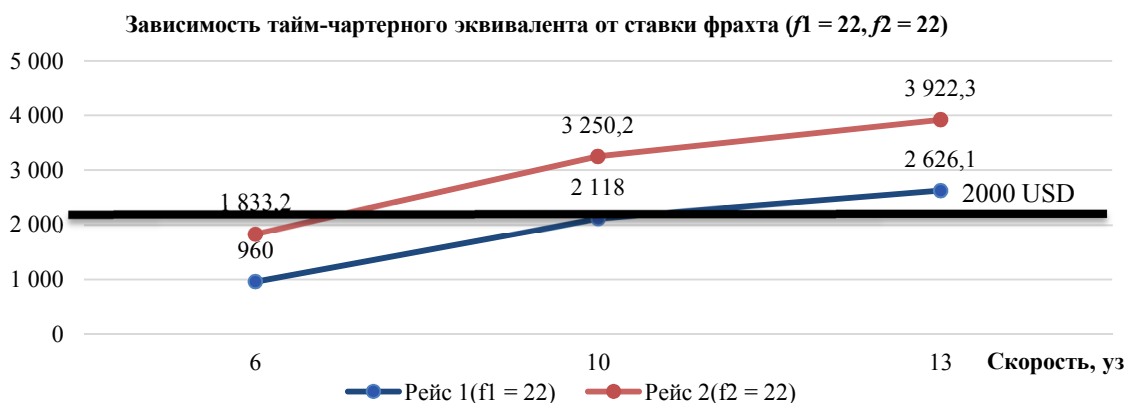


Рис. 6. График зависимости тайм-чартерного эквивалента т/х Singularity от скорости движения и ставки фрахта ($f_1 = 22, f_2 = 22$)

Fig. 6. Graph of the dependence of the time charter equivalent of m/v Singularity on the speed of movement and the freight rate ($f_1 = 22, f_2 = 22$)

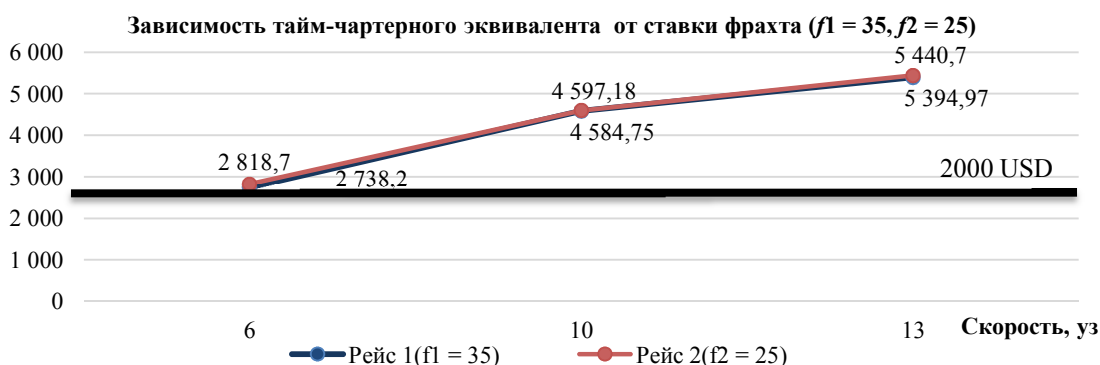


Рис. 7. График зависимости тайм-чартерного эквивалента т/х Singularity от скорости движения и ставки фрахта ($f_1 = 35, f_2 = 25$)

Fig. 7. Graph of the dependence of the time charter equivalent of m/v Singularity on the speed of movement and the freight rate ($f_1 = 35, f_2 = 25$)

Оптимальная скорость ограничена скоростью полного хода и минимально допустимой величиной по правилам эксплуатации главного двигателя [2–4]. В настоящих условиях в качестве ограничения сверху может быть использован индекс углеродоемкости СП по скорости v_{ref} :

$$v_{\min} < v_{opt} < v_{\max} = v_{ref}.$$

Минимально допустимая скорость v_{\min} определяется безопасной эксплуатацией судна и принимается не меньше 2/3 от максимальной скорости [5–7].

Минимизация расходов на 1 милю перехода дает оптимальную эксплуатационную скорость, будем считать, что оптимизируются только ходовые параметры, зависящие от эксплуатационной скорости, тогда расходы фрахователя на ходу составят:

$$r = (A_p + c_1 q_1(v) + c_2 q_2) / 24v \rightarrow \min, \quad (1)$$

где A_p – ставка фрахта в сутки; c_1 – стоимость 1 т топлива на главный двигатель; c_2 – стоимость 1 т топлива на дизель-генераторы; $q_1(v)$ – расход топлива в сутки, т на главный двигатель; q_2 – расход топлива в сутки, т на дизель-генераторы.

Используем в (1) расход топлива в форме $q_1 = av^b$, продифференцируем, приравняем нулю и решим данное уравнение, тогда получим:

$$v_{opt} = [(A_p + c_2 q_2) / ((b-1)c_1 a)]^{1/b}, \quad (2)$$

$$\text{т. е. } v_{opt} = f(A_p, c_1, c_2).$$

Согласно (2) оптимальная эксплуатационная скорость всегда определяется уровнем фраховых ставок и ценой на бункер. Разумеется, при определенной рыночной ситуации и техническом состоя-

нии судна под рейтингом СП эксплуатация судна может оказаться нерентабельной при ограничениях по v_{ref} [8]. При этом пострадают в первую очередь быстроходные линейные суда – контейнеровозы малых и средних размерений, которым необходимо поддерживать жесткое расписание на линии.

Заключение

Основной состав мирового коммерческого флота – это трамповые суда, для которых используются малые или средние эксплуатационные скорости. Поведение судоходных компаний на фраховом рынке будет корректироваться начиная с 2024 г. в соответствии с достижениями рейтингов углеродоемкости СП и проведением операционных корректирующих мероприятий по энергоэффективности судов.

Предложенные методологические подходы назначения экономических скоростей для обеспечения энергоэффективности морских судов в эксплуатации определяют их связь с фраховой ставкой и ценой на бункер. Порог рентабельной работы морского судна на фраховом рынке при ограничениях на энергоэффективность и углеродоемкость по критерию СП зависит от назначенной средней эксплуатационной скорости. Используя предложенную в работе методологию, можно осуществлять подготовку судов к рейсу и разрабатывать планы улучшения энергоэффективности, в том числе вносить в них корректирующие действия для судов в эксплуатации с учетом достижения ежегодных приемлемых показателей энергоэффективности и положительных рейтингов углеродоемкости на период до 2030 г.

Список источников

1. The Review of Maritime Transport 2022. URL: <https://unctad.org> (дата обращения: 10.11.2023).
2. Резолюция МЕРС 333 (76). Руководство по методу расчета достигнутого ЕЕХИ, 2021. URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.333\(76\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.333(76).pdf) (дата обращения: 10.11.2023).
3. Резолюция МЕРС 334 (76). Руководство по освидетельствованию и сертификации ЕЕХИ, 2021. URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.334\(76\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.334(76).pdf) (дата обращения: 12.11.2023).
4. Резолюция МЕРС 335 (76). Руководство по ограничению мощности на валу / двигателя и использование резерва мощности (G1), 2021. URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.335\(76\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.335(76).pdf) (дата обращения: 12.11.2023).
5. Резолюция МЕРС 337 (76). Руководство по базовым линиям для использования с эксплуатационным коэффициентом углеродной эффективности (G2), 2021. URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.337\(76\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.337(76).pdf) (дата обращения: 13.11.2023).
6. Резолюция МЕРС 338 (76). Руководство по понижающим коэффициентам эксплуатационной углеродной интенсивности (G3), 2021. URL: https://www.imo.org/rules.com/MEPCRES_338.76.html (дата обращения: 13.11.2023).
7. Резолюция МЕРС 333 (76). Руководство по определению рейтинга эксплуатационной углеродной интенсивности судов (G4), 2021. URL: https://www.imo.org/rules.com/MEPCRES_333.76.html (дата обращения: 13.11.2023).
8. Москаленко В. М. Энергоэффективность морского судна в эксплуатации // Высокие технологии и инновации в науке: сб. тр. Междунар. науч. конф. (Санкт-Петербург, 27 сентября 2021 г.). СПб.: Изд-во ГНИИ «Нацразвитие», 2021. С. 97–102.

References

1. *The Review of Maritime Transport 2022*. Available at: <https://unctad.org> (accessed: 10.11.2023).
2. *Rezoliutsiia MERS. 333 (76). Rukovodstvo po metodu rascheta dostignutogo EEXI, 2021* [Resolution of the MERS. 333 (76). Guide to the method of calculating the achieved EEXI, 2021]. Available at: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.333\(76\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.333(76).pdf) (accessed: 10.11.2023).
3. *Rezoliutsiia MERS. 334 (76). Rukovodstvo po osvivedel'stvovaniiu i sertifikatsii EEXI, 2021* [Resolution of the MERS. 334 (76). EEXI Inspection and Certification Guide, 2021]. Available at: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.334\(76\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.334(76).pdf) (accessed: 12.11.2023).
4. *Rezoliutsiia MERS 335 (76). Rukovodstvo po ogranicheniiu moshchnosti na valu / dvigatel'ia i ispol'zovanie rezerva moshchnosti (G1), 2021* [Resolution MEPC 335 (76). Guidance on Shaft/Motor Power Limitation and Use of Power Reserve (G1), 2021]. Available at: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.335\(76\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.335(76).pdf) (accessed: 12.11.2023).
5. *Rezoliutsiia MERS 337 (76). Rukovodstvo po bazovym liniyam dlia ispol'zovaniia s ekspluatatsionnym koefitsientom uglerodnoi effektivnosti (G2), 2021* [Resolution MEPC 337 (76). Guideline for baselines for use with an operational carbon efficiency factor (G2), 2021]. Available at: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.337\(76\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.337(76).pdf) (accessed: 13.11.2023).
6. *Rezoliutsiia MERS 338 (76). Rukovodstvo po ponizhaiushchim koefitsientam ekspluatatsionnoi uglerodnoi intensivnosti (G3), 2021* [Resolution MEPC 338 (76). Guidance on Operational Carbon Intensity Reduction Factors (G3), 2021]. Available at: https://www.imo.org/MEPCRES_338.76.html (accessed: 13.11.2023).
7. *Rezoliutsiia MERS 333 (76). Rukovodstvo po opredeleniiu reitinga ekspluatatsionnoi uglerodnoi intensivnosti sudov (G4), 2021* [Resolution MEPC 333 (76). Guidelines for determining the operational carbon intensity rating of ships (G4), 2021]. Available at: https://www.imo.org/MEPCRES_333.76.html (accessed: 13.11.2023).
8. Moskalenko V. M. *Energoeffektivnost' morskogo sudna v ekspluatatsii. Vysokie tekhnologii i innovatsii v nauke* [Energy efficiency of a marine vessel in operation. High technologies and innovations in science]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Saint-Petersburg, 27 sentiabria 2021 g.)*. Saint Petersburg, Izd-vo GNII «Natsrazvitiie», 2021. Pp. 97-102.

Статья поступила в редакцию 15.11.2023; одобрена после рецензирования 01.04.2024; принята к публикации 11.04.2024
The article was submitted 15.11.2023; approved after reviewing 01.04.2024; accepted for publication 11.04.2024

Информация об авторах / Information about the authors

Владислав Михайлович Москаленко – аспирант кафедры управления морским транспортом; Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского; asmsh@rambler.ru

Михаил Анатольевич Москаленко – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой технологии и организации судоремонта; Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского; asmsh@rambler.ru

Александр Анатольевич Луговец – доктор экономических наук; профессор кафедры управления морским транспортом; Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского; asmsh@rambler.ru

Vladislav M. Moskalenko – Postgraduate Student of the Department of Maritime Transport Management; Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy; asmsh@rambler.ru

Mikhail A. Moskalenko – Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Ship Repair Technologies and Organizations; Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy; asmsh@rambler.ru

Aleksandr A. Lugovets – Doctor of Economic Sciences; Professor of the Department of Maritime Transport Management; Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy; asmsh@rambler.ru

