

УДК 629.5

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-101-111

ARTICLE HISTORY

Received 04.04.2026

Accepted 30.04.2026

Системне оцінювання технологій декарбонізації морського транспорту

Сагін Арсеній Сергійович

Національний університет «Одеська морська академія», Одеса,

Україна

arseniysagin@gmail.com

System Assessment of Maritime Transport Decarbonization Technologies

Sagin Arseniy

NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine

arseniysagin@gmail.com³

Резюме. У статті розглянуто системне багатокритеріальне оцінювання технологій декарбонізації морського транспорту з урахуванням технічних, економічних, експлуатаційних та інфраструктурних факторів. Дослідження показало, що у короткостроковій перспективі найбільш раціональними є технології поступової декарбонізації, тоді як у довгостроковому часовому горизонті суттєво зростає придатність безвуглецевих енергетичних систем. Отримані результати підтверджують необхідність використання багатотехнологічного та сегментно-орієнтованого підходу до декарбонізації морського транспорту.

Abstract. The article considers a systemic multi-criteria assessment of maritime transport decarbonization technologies considering technical, economic, operational, and infrastructure factors. The study demonstrates that gradual decarbonization technologies remain the most rational in the short-term perspective, while the suitability of zero-carbon energy systems significantly increases in the long-term horizon. The obtained results confirm the necessity of a multi-technology and segment-oriented approach to maritime transport decarbonization.

Декарбонізація морського транспорту є одним із ключових напрямів сучасного енергетичного переходу та скорочення викидів парникових газів у глобальній транспортній системі. Посилення міжнародних екологічних вимог, реалізація ІМО 2023 GHG (Greenhouse Gas) Strategy, зростання вартості традиційних палив і необхідність переходу до низьковуглецевої економіки формують нові технічні та економічні умови функціонування світового судноплавства. Відповідно до сучасних міжнародних цілей морський транспорт повинен забезпечити суттєве зменшення викидів до 2050 року, що стимулює розвиток альтернативних палив, енергоефективних технологій та нових підходів до формування суднових енергетичних систем [1, 2].

Морський транспорт характеризується значною різноманітністю експлуатаційних профілів, рівнів енергоспоживання, автономності та інфраструктурних обмежень. Контейнеровози, балкери, танкери, пасажирські, офшорні та спеціалізовані судна мають різні режими експлуатації й потребують різних енергетичних рішень. У результаті технологія, яка є ефективною для одного сегмента флоту, може бути технічно складною або економічно нераціональною для іншого. Це свідчить про неможливість використання єдиного універсального підходу до декарбонізації морського транспорту. У більшості досліджень морське судно розглядається як інтегрована енергетична та експлуатаційна система, у межах якої взаємодіють корпус судна, рушійна установка, допоміжні механізми, системи енергоспоживання, паливна система та експлуатаційне середовище [3, 4]. Ефективність технологій декарбонізації визначається не лише рівнем скорочення викидів, а й можливістю інтеграції технології у конкретний експлуатаційний профіль судна з урахуванням безпеки, інфраструктурної готовності та економічної доцільності [5, 6].

Для оцінювання технологій декарбонізації доцільно використовувати багатокритеріальний аналіз прийняття рішень (Multi-Criteria Decision Analysis – MCDA) із застосуванням методу рангового оцінювання критеріїв (Rank Order Centroid – ROC) та методу зваженої суми (Simple Additive Weighting – SAW). Запропонований підхід дозволяє інтегрувати технічні, економічні, експлуатаційні та інфраструктурні фактори у єдину систему оцінювання. На відміну від методів, орієнтованих виключно на рівень скорочення викидів, дана структура забезпечує можливість комплексного оцінювання практичної придатності технологій для сучасного морського транспорту [7 - 9]. Концептуальна структура взаємодії суднових систем та факторів декарбонізації морських суден надана на рис. 1.

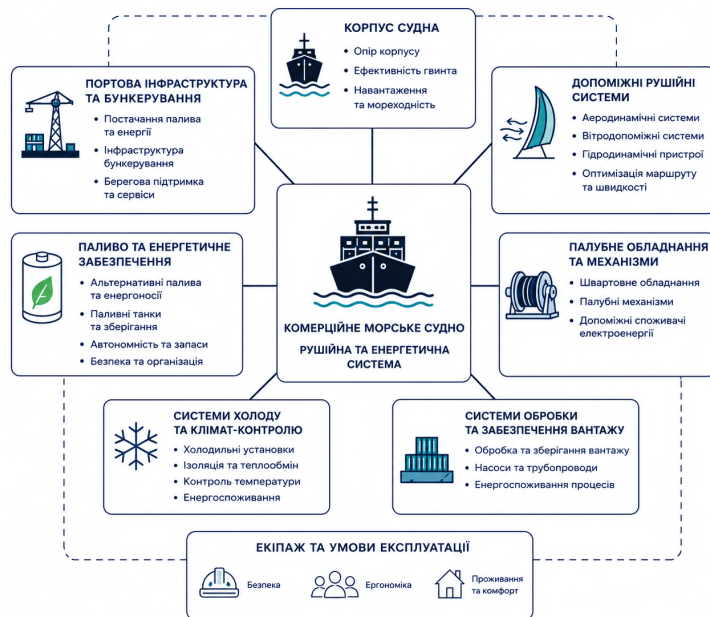


Рис. 1. Концептуальна структура взаємодії суднових систем та факторів декарбонізації морських суден

У межах дослідження проаналізовано десять технологічних альтернатив, що охоплюють як альтернативні паливні рішення, так і заходи підвищення енергоефективності.

До основних альтернативних палив віднесено біопалива, яке складають гідровані рослинні мастила (Hydrotreated Vegetable Oil – HVO), скраплений природний газ (Liquefied Natural Gas – LNG), скраплений природний газ біологічного походження – BioLNG, скраплений біогаз (Liquefied Biogas – LBG), метанол, водень та аміак [10 - 12]. Додатково розглянуто гібридні енергетичні системи, експлуатаційні заходи, гідродинамічні модифікації, утилізацію відпрацьованого тепла та вітропоміжні рушійні системи.

Оцінювання виконувалося за критеріями потенціалу скорочення викидів, технічної придатності, експлуатаційної сумісності, економічної доцільності, доступності інфраструктури, безпеки та технологічної зрілості. Для забезпечення порівнюваності технологій використовувалася єдина п'ятибальна система оцінювання [13, 14].

Динаміка інтегральної придатності основних технологій декарбонізації морських суден відповідно до цієї технології надана на рис. 2.

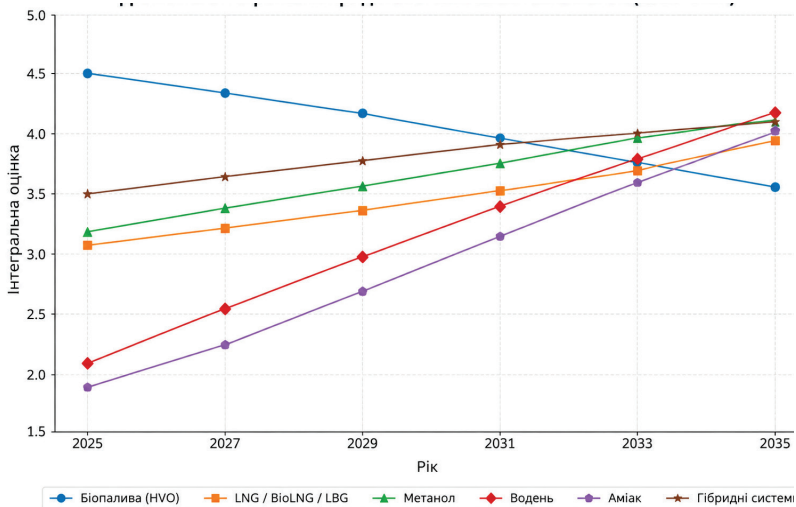


Рис.2. Динаміка інтегральної придатності основних технологій декарбонізації морських суден

Допоміжні технології підвищення енергоефективності також відіграють важливу роль у процесі декарбонізації морського транспорту. Гідродинамічні модифікації корпусу, оптимізація швидкісних режимів, системи утилізації відпрацьованого тепла та вітропоміжні рушійні системи здатні забезпечувати скорочення енергоспоживання у межах 5 ... 25 % залежно від типу судна та умов експлуатації. Хоча такі рішення не забезпечують повної декарбонізації, вони дозволяють суттєво зменшити споживання палива та покращити загальну енергетичну ефективність суден [15 - 17].

Важливою особливістю сучасного енергетичного переходу є поступове формування комбінованих суднових енергетичних систем. Результати дослідження показують, що найбільш ефективними у перспективі можуть стати інтегровані рішення, які поєднуюватимуть альтернативні палива, системи накопичення енергії, цифрові системи оптимізації енергоспоживання та допоміжні енергоефективні технології. Такий підхід дозволяє зменшити технічні ризики та забезпечити більш гнучку адаптацію морського транспорту до змін міжнародних екологічних вимог.

Окрему роль у процесі декарбонізації відіграють інфраструктурні фактори. Рівень розвитку паливної інфраструктури значною мірою визначає швидкість впровадження альтернативних енергетичних рішень.

Для LNG та метанолу вже формується міжнародна мережа бункерування, тоді як для водню та аміаку інфраструктурні обмеження залишаються одним із головних стримувальних факторів. У результаті навіть технології з високим потенціалом скорочення викидів можуть мати обмежене практичне застосування на сучасному етапі розвитку морського транспорту [18 - 20].

Крім інфраструктурних аспектів, суттєвий вплив мають економічні фактори. Вартість модернізації суден, необхідність встановлення нових паливних систем, зміна конструкції паливних танків та впровадження додаткових систем безпеки значно впливають на раціональність використання окремих технологій. Для більшості судновласників короткострокова економічна ефективність залишається одним із ключових критеріїв прийняття рішень, що пояснює збереження високої актуальності технологій поступової декарбонізації [21 - 23].

Важливим результатом дослідження є також підтвердження того, що ефективність технологій декарбонізації суттєво залежить від часового горизонту оцінювання.

Технології, які демонструють високий рівень практичної придатності у короткостроковій перспективі, не обов'язково залишатимуться домінуючими у довгостроковому періоді. Наприклад, біопалива типу HVO та експлуатаційні заходи мають найвищі інтегральні оцінки на початкових етапах декарбонізації завдяки можливості швидкого впровадження без суттєвої модернізації суден. Проте у перспективі до 2035 року їхній потенціал поступово обмежується необхідністю досягнення більш глибокого рівня скорочення викидів.

Водночас водень та аміак, які на сучасному етапі характеризуються високими технічними та інфраструктурними ризиками, у довгостроковому часовому горизонті демонструють значне зростання інтегральної придатності [24, 25]. Це пояснюється очікуваним розвитком технологій зберігання та транспортування палива, удосконаленням паливних елементів, зниженням вартості виробництва «зеленого» водню та поступовим формуванням міжнародної паливної інфраструктури.

Результати оцінювання надані у таблиці 1, у який використана шкала вимірювання від 1 до 5, де 1 – найменша, 5 – найвища оцінка ефективності використання методу чи технології.

Таблиця 1

Узагальнені інтегральні оцінки раціональності технологій

Технологія	2025	2030	2033	2035
Drop-in біопалива / HVO	4,5	4,4	4,1	3,8
LNG / BioLNG / LBG	3,1	3,4	3,9	4,0
Метанол	3,2	3,6	4,0	4,1
Водень	2,1	2,6	3,5	4,2
Аміак	1,9	2,4	3,6	4,3
Гібридні системи	3,5	3,8	4,0	4,0
Експлуатаційні заходи	4,7	4,5	4,2	4,1
Гідродинамічні модифікації	3,0	3,2	3,3	3,8
Утилізація відпрацьованого тепла	2,8	3,0	3,1	3,6
Вітропоміжний рух	2,9	3,1	3,4	3,7

Не менш важливим фактором залишається міжнародне регулювання. Впровадження показнику вуглецевої інтенсивності судна (Carbon Intensity Indicator – CII) та індексу енергоефективності (Energy Efficiency Existing Ship Index – EEXI) та інших екологічних механізмів поступово формує нові вимоги до енергоефективності та вуглецевої інтенсивності морських перевезень. У результаті екологічні критерії стають не лише технічним, а й економічним фактором конкурентоспроможності морського транспорту. Це стимулює судновласників до впровадження технологій декарбонізації навіть у випадках, коли короткострокова економічна ефективність таких рішень залишається обмеженою [26 - 28].

Перспективним напрямом подальших досліджень є також інтеграція життєвого циклу палива та енергетичних систем у структуру багатокритеріального оцінювання. У сучасних умовах ефективність технології визначається не лише експлуатаційними викидами на борту судна, але й повним життєвим циклом виробництва, транспортування та зберігання енергоносіїв. Саме тому дедалі більшого значення набувають підходи Well-to-Wake (підхід комплексного оцінювання викидів парникових газів протягом усього паливного циклу – від виробництва палива до його використання на борту судна) та Life Cycle Assessment (оцінювання життєвого циклу технології або продукту з урахуванням екологічного впливу на всіх етапах виробництва,

експлуатації та утилізації.), які дозволяють оцінювати реальний екологічний ефект альтернативних палив[29, 30].

Для окремих технологій різниця між локальним скороченням викидів та повним життєвим циклом може бути суттєвою. Наприклад, ефективність водню або аміаку значною мірою залежить від джерела виробництва енергії. Використання «зеленого» водню, виробленого за рахунок відновлюваних джерел енергії, забезпечує значно вищий екологічний ефект порівняно з технологіями, що базуються на викопному паливі.

Крім екологічних аспектів, подальший розвиток морського транспорту буде залежати від швидкості технологічної модернізації світового флоту. Значна частина існуючих суден була спроектована для використання традиційних паливних систем, тому повний перехід до безвуглецевих технологій потребуватиме тривалого періоду адаптації. У багатьох випадках модернізація існуючих суден є технічно складною або економічно обмеженою, що додатково підсилює актуальність перехідних технологій декарбонізації [31 - 33].

Важливим фактором залишається і нерівномірність розвитку міжнародної портової інфраструктури. Навіть за умови активного розвитку альтернативних енергетичних систем окремі регіони можуть суттєво відрізнятися за рівнем готовності до використання нових палив. Це створює додаткові експлуатаційні ризики для суден, які працюють на глобальних маршрутах, та обмежує швидкість переходу до окремих безвуглецевих рішень.

У результаті найбільш реалістичним сценарієм розвитку морського транспорту у найближчі десятиліття є поєднання кількох напрямів декарбонізації одночасно. До таких напрямів належать підвищення енергоефективності, використання перехідних альтернативних палив, розвиток гібридних енергетичних систем та поступове впровадження безвуглецевих технологій.

Запропонований у дослідженні багатокритеріальний підхід дозволяє враховувати складний взаємозв'язок між технічними характеристиками суден, економічними факторами, інфраструктурними обмеженнями та міжнародними екологічними вимогами. Це забезпечує можливість формування більш обґрунтованих стратегій декарбонізації як для окремих суден, так і для морського транспорту в цілому [34 - 36].

Результати дослідження підтверджують необхідність переходу від універсальних моделей декарбонізації до сегментно-орієнтованих підходів, які враховують специфіку експлуатації різних типів морських суден та особливості їх енергетичних систем. Використання

багатокритеріального аналізу створює основу для комплексного оцінювання технологій декарбонізації та може бути використане під час формування довгострокової політики розвитку морського транспорту в умовах глобального енергетичного переходу.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Sagin S, Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – Vol. 13(3). – P. 589.
2. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін А.С. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі // *Автоматизація суднових технічних засобів : наук.-техн. зб.* – 2021. – Вип. 27. – С. 93 - 107.
3. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів експлуатації суднових двигунів внутрішнього згоряння під час використання біодизельного палива // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2024. – Вип. 48. – С. 100 - 113.
4. Заблоцький Ю.В. Підвищення економічності роботи суднових дизелів // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* . – 2020. – Вип. 40. – С. 12 - 16.
5. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // *Водний транспорт. Збірник наукових праць.* – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193 - 205.
6. Zablotsky Yu.V., Sagin S.V. Maintaining Boundary and Hydrodynamic Lubrication Modes in Operating High-pressure Fuel Injection Pumps of Marine Diesel Engines // *Indian Journal of Science and Technology*. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 20. – P. 208 - 216.
7. Zablotsky Yu.V., Sagin S.V. Enhancing Fuel Efficiency and Environmental Specifications of a Marine Diesel When using Fuel Additives // *Indian Journal of Science and Technology*. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 46. – P. 353 - 362.
8. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Діагностування технічного стану суднових енергетичних установок засобів водного транспорту // *Водний транспорт.* – 2023. – № 2(38). – С. 164 - 175.
9. Мадей В.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Оцінка ефективності використання палива біологічного походження в суднових дизелях // *Розвиток транспорту.* – 2025. – № 2. – С. 71 - 85.

10. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи суднових середньооборотних дизелів // Водний транспорт: збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166 - 179.

11. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2022. – Вип. 45. – С. 5 - 16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.

12. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – С. 10 - 14.

13. Malukas A., Lebedevas S. Decarbonization and Improvement of Energy Efficiency of FSRU by Cryogenic CO₂ Capture // Journal of Marine Science and Engineering. – 2025. – Vol. 13. – P. 770.

14. Drazdauskas M., Lebedevas S. Optimization of Combustion Cycle Energy Efficiency and Exhaust Gas Emissions of Marine Dual-Fuel Engine by Intensifying Ammonia Injection // Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12. – P. 309.

15. Drazdauskas M., Lebedevas S. Numerical Study on Optimization of Combustion Cycle Parameters and Exhaust Gas Emissions in Marine Dual-Fuel Engines by Adjusting Ammonia Injection Phases // Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12. – P. 1340.

16. Сагін С.В., Куропятник О.А., Руснак Д.Ю., Парменова Д.Г. Зниження емісії оксидів сірки з випускними газами суднових дизелів шляхом ультразвукової обробки палива // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2025. – Вип. 30. – С. 121 - 138.

17. Сагін С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – С. 79-89.

18. Сагін С.В., Куропятник О.А. Аналіз впливу біодизельного палива на екологічні та економічні показники роботи суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180 - 194.

19. Сагін А.С. Корегування налаштування паливної апаратури високого тиску під час переведення суднових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – С. 67 - 78.

20. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 206 - 215.

21. Горб С.И., Горб А.С. Програмное обеспечение для управления активами на судах // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2018. – Вип. 24. – Одесса : ОНМА. – С. 34 - 48.

22. Сагін С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності суднових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення // Водний транспорт. – 2023. – № 1(37). – С. 59 - 70.
23. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 46. – С. 118 - 131.
24. Горб С.И., Каменева А.В., Запороженченко Н.В. Модернизация структуры упрощённой системы технического менеджмента судов // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2016. – Вип. 22. – Одесса: ОНМА. – С. 33 - 38.
25. Сагін С.С., Сагін С.В. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 215 - 225.
26. Сандлер, А. К., Опрышко, М. О. Волоконно-оптический датчик контроля состояния технических жидкостей и газов // X міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 24.11.2020 - 25.11.2020 р.: матеріали конференції. – Одеса: НУ "ОМА". – 2020. – С. 63 - 68. DOI:10.31653/2706-7874.SEEEA-2020.11.1-245.
27. Сандлер, А. К., Данчук, Д. П. Засіб підвищення ефективності моніторингу стану вантажу на судах-газовозах на основі волоконно-оптичних технологій // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2021. – Т. 13. – №. 4. – Одеса: ОНАХТ. – С. 18 - 26. DOI: 10.15673/atbp.v13i4.2202.
28. Горб С.И. Повышение точности численного моделирования рабочих процессов дизелей // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2020. – Вип. 26. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 3 - 26.
29. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Оценка эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих жидкостей судовых технических средств // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2016. – Вип. 22. – С. 66 - 74.
30. Заблоцький Ю.В. Аналіз особливостей процесу мащення циліндрової групи суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 67-78. doi: 10.31653/10.31653/smf46.2023.67-78.
31. Сагин С.В. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей за счет использования органических покрытий // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2018. – Вип. 4(57). – С. 109 - 120.

32. Горб С.И. Оптимизация главного двигателя на режиме экономического хода судна // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 17 - 34.

33. Сандлер, А. К., Карпілов, О. Ю., Удолатій, В. Б. Волоконно-оптичний пристрій для систем автоматизованого екологічного моніторингу // Automation of Technological and Business Processes. – 2024. – № 16 (3). – Р. 95 - 99. <https://doi.org/10.15673/atbp.v16i3.2880>.

34. Сандлер, А. К., Цюпко, Ю. М., Сандлер, О. А., Цюпко, К. Ю. Схемотехнічне рішення комбінованого датчика клімат-контролю // Автоматизация судовых технических средств. – 2014. – Вып. 19. – Одесса: ОНМА. – С. 69 - 73.

35. Заблочкий Ю.В. Исследование влияния органических покрытий на работу элементов топливной аппаратуры высокого давления судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2015. – № 35. – Одесса: НУ ОМА. – С. 83-92.

36. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // Lubricants. – 2025. – Vol. 13(4). – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.

Abstract. The article considers modern approaches to maritime transport decarbonization under the conditions of the global energy transition, strengthening international environmental regulations, and the necessity to reduce greenhouse gas emissions in shipping. The study analyzes the implementation of alternative fuels and energy-efficiency technologies for different segments of the maritime fleet considering technical, economic, operational, and infrastructure factors. A marine vessel is considered as an integrated energy and operational system whose efficiency depends on the interaction of energy, technological, and operational parameters. A multi-criteria decision-making approach (MCDA) combined with ROC weighting and the SAW method was applied for the assessment of decarbonization technologies. The study includes the analysis of alternative fuel solutions such as drop-in/HVO biofuels, LNG/BioLNG/LBG, methanol, hydrogen, and ammonia, as well as supporting energy-efficiency technologies. Dynamic assessment of the technologies was performed within the time horizon up to 2050. The results demonstrate that gradual decarbonization technologies remain the most rational solutions in the short-term perspective, while the suitability of zero-carbon energy systems significantly increases in the long-term horizon. The obtained results confirm the necessity of a segment-oriented and multi-technology approach to maritime transport decarbonization.