Мельник Олена Михайлівна, аспірант кафедри навігації та управління судном, Херсонська державна морська академія, https://orcid.org/0009-0001-5893-5955

Melnyk Olena, Graduate Student, Department of Navigation and Ship Handling, Kherson State Maritime Academy, https://orcid.org/0009-0001-5893-5955

РИЗИКИ БУНКЕРУВАННЯ СУДЕН АЛЬТЕРНАТИВНИМИ ПАЛИВАМИ: СИСТЕМАТИЗАЦІЯ НЕБЕЗПЕК ТА ФАКТОРІВ ЇХ ФОРМУВАННЯ

RISKS ASSOCIATED WITH FUELING SHIPS WITH ALTERNATIVE FUELS: A CLASSIFICATION OF HAZARDS AND THE FACTORS CONTRIBUTING TO THEM

Анотація

У статті розглянуто ризики, що виникають під час бункерування суден альтернативними видами палива, та систематизовано характерні небезпеки використання зрідженого природного газу, метанолу, аміаку та водню з урахуванням особливостей їхніх фізико-хімічних властивостей і можливих аварійних сценаріїв. Встановлено причинно-наслідковий зв'язок між джерелами небезпеки, порушенням герметичності системи передавання палива, розвитком аварійної події та її можливими наслідками. Визначено фактори, що впливають на ризик бункерування, і показано, що рівень ризику визначається їх взаємодією на різних етапах розвитку небезпечної події. Запропоновано структурне представлення процесу формування ризику, яке пов'язує умови виникнення небезпечної події, розвиток аварійного сценарію та тяжкість його наслідків. Отримані результати можуть бути використані

для системного аналізу ризиків бункерувальних операцій та обґрунтування запобіжних і захисних заходів залежно від виду альтернативного палива й умов виконання операції.

Ключові слова: альтернативні палива, бункерування суден, ризик, небезпека, аварійний сценарій, LNG, метанол, аміак, водень, безпека судноплавства.

Abstract

This article examines the risks associated with bunkering ships with alternative fuels and systematizes the typical hazards of using liquefied natural gas, methanol, ammonia, and hydrogen, taking into account their specific physicochemical properties and possible accident scenarios. A cause-and-effect relationship has been established between sources of danger, leaks in the fuel transfer system, the progression of an emergency event, and its possible consequences. Factors influencing the risk of bunkering are presented, and it is shown that the level of risk is determined by their interaction at various stages of a hazardous event’s progression. A structural representation of the risk formation process is proposed, linking the conditions for the occurrence of a hazardous event, the development of an accident scenario, and the severity of its consequences. The results obtained can be used for a systematic analysis of the risks associated with bunkering operations and for justifying preventive and protective measures depending on the type of alternative fuel and the conditions under which the operation is performed.

Keywords: alternative fuels, ship bunkering, risk, hazard, emergency scenario, LNG, methanol, ammonia, hydrogen, maritime safety.

Постановка проблеми. Декарбонізація морського транспорту супроводжується розширенням використання палив, фізико-хімічні та

експлуатаційні властивості яких суттєво відрізняються від традиційних нафтових палив. Зріджений природний газ, метанол, аміак і водень розглядаються як можливі складові переходу морської галузі до низьковуглецевих та безвуглецевих енергетичних рішень. Водночас їх застосування змінює не тільки конструкцію суднових паливних систем, але й умови виконання операцій приймання, зберігання та передавання палива [1-5].

Особливо критичним етапом є бункерування, під час якого одночасно взаємодіють судно, джерело постачання палива, технологічне обладнання, персонал та зовнішнє середовище. Порушення герметичності з'єднань, пошкодження рукавів або трубопроводів, помилки під час підключення та відключення обладнання, відхилення параметрів передавання палива чи несвоєчасне припинення операції можуть формувати початкові умови для розвитку аварійного сценарію [6, 7]. Дослідження останніх років показують, що саме сценарії неконтрольованого викиду палива займають центральне місце в оцінюванні операційного ризику альтернативного бункерування [8-10].

Принциповою особливістю проблеми є відсутність універсального профілю небезпеки для різних альтернативних видів палива. Для LNG суттєвими є кріогенні ефекти, випаровування та формування займистої парогазової хмари; для метанолу поряд із пожежонебезпечністю необхідно враховувати токсичний вплив; для аміаку визначальним фактором стає токсичність його парів, тоді як використання водню пов'язане з високою займистістю та специфічними умовами його зберігання і поширення після витоку [11-13]. Порівняльні дослідження LNG, рідкого водню та аміаку також демонструють суттєві відмінності в інтенсивності випаровування та характері поширення хмар після аварійного викиду [14-18].

Отже, саме поняття «ризик бункерування альтернативним паливом» не може розглядатися як однорідна характеристика, де рівень і структура ризику визначаються поєднанням властивостей конкретного палива, способу бункерування, інтенсивності його передавання, параметрів можливого витоку, технічного стану обладнання, метеорологічних умов, просторової конфігурації зони бункерування та ефективності застосованих захисних бар'єрів. Унаслідок цього однакова за причиною відмова технологічного обладнання для різних палив може формувати принципово різні сценарії розвитку аварії та різний характер її наслідків.

Нормативне забезпечення також розвивається нерівномірно. IGF Code встановлює загальну міжнародну рамку безпеки для суден, що використовують гази або інші палива з низькою температурою спалаху, тоді як для нових видів палива IMO паралельно розробляє та актуалізує спеціалізовані положення і рекомендації. Станом на 2026 рік діють тимчасові рекомендації IMO щодо безпечного використання аміаку як суднового палива, тоді як робота над подальшими обов'язковими та паливоспецифічними положеннями триває.

За таких умов актуальним науковим завданням є не лише дослідження окремих аварійних сценаріїв, а й систематизація небезпек бункерування альтернативними паливами за єдиною логікою їх виникнення та розвитку. Такий підхід повинен забезпечувати послідовний перехід від властивостей палива та умов проведення операції до ідентифікації небезпеки, формування аварійного сценарію, оцінювання його ймовірності та наслідків, визначення рівня ризику й обґрунтування необхідних заходів безпеки.

Метою дослідження є систематизація характерних небезпек бункерування суден альтернативними паливами та формування узагальненого підходу до оцінювання пов'язаних із ними ризиків з

урахуванням виду палива, умов виконання бункерувальної операції, можливих аварійних сценаріїв і заходів зниження ризику.

Основний матеріал дослідження. Бункерування альтернативними паливами являє собою сукупність взаємопов'язаних технологічних операцій, у межах яких небезпека визначається не лише властивостями палива, але й умовами його зберігання, передавання та можливого неконтрольованого вивільнення. Тому для систематизації ризиків доцільно розмежовувати джерело небезпеки, небезпечну подію та можливі наслідки, оскільки одна й та сама первинна відмова залежно від виду палива та умов бункерування може призводити до різних сценаріїв розвитку аварії.

Як вихідну основу розглянемо чотири групи альтернативних палив: зріджений природний газ (LNG), метанол, аміак та водень. Їх використання характеризується різними умовами зберігання, агрегатним станом, температурними режимами, токсичністю та пожежо- і вибухонебезпечністю. Відповідно, склад небезпек доцільно формувати окремо для кожного виду палива з подальшим виділенням спільних факторів, характерних для бункерувальної операції в цілому.

Основною початковою подією для більшості аварійних сценаріїв є порушення герметичності системи передавання палива і джерелами такого порушення можуть бути пошкодження бункерувального рукава або трубопроводу, відмова арматури, розгерметизація з'єднань, перевищення допустимих параметрів передавання, механічне переміщення суден, а також помилки персоналу. Подальший розвиток події визначається властивостями палива, кількістю вивільненої речовини, тривалістю витоку, умовами вентиляції, наявністю джерел запалювання та характеристиками навколишнього середовища.

Для встановлення причинно-наслідкових зв'язків між первинними відмовами та можливими наслідками запропоновано структурно-логічне представлення аварійного процесу. У ньому враховано кількість вивільненого палива, тривалість витоку, умови вентиляції, наявність джерел запалювання, метеорологічні умови та просторову конфігурацію місця бункерування. Узагальнену послідовність формування і розвитку відповідних аварійних сценаріїв наведено на рис. 1.

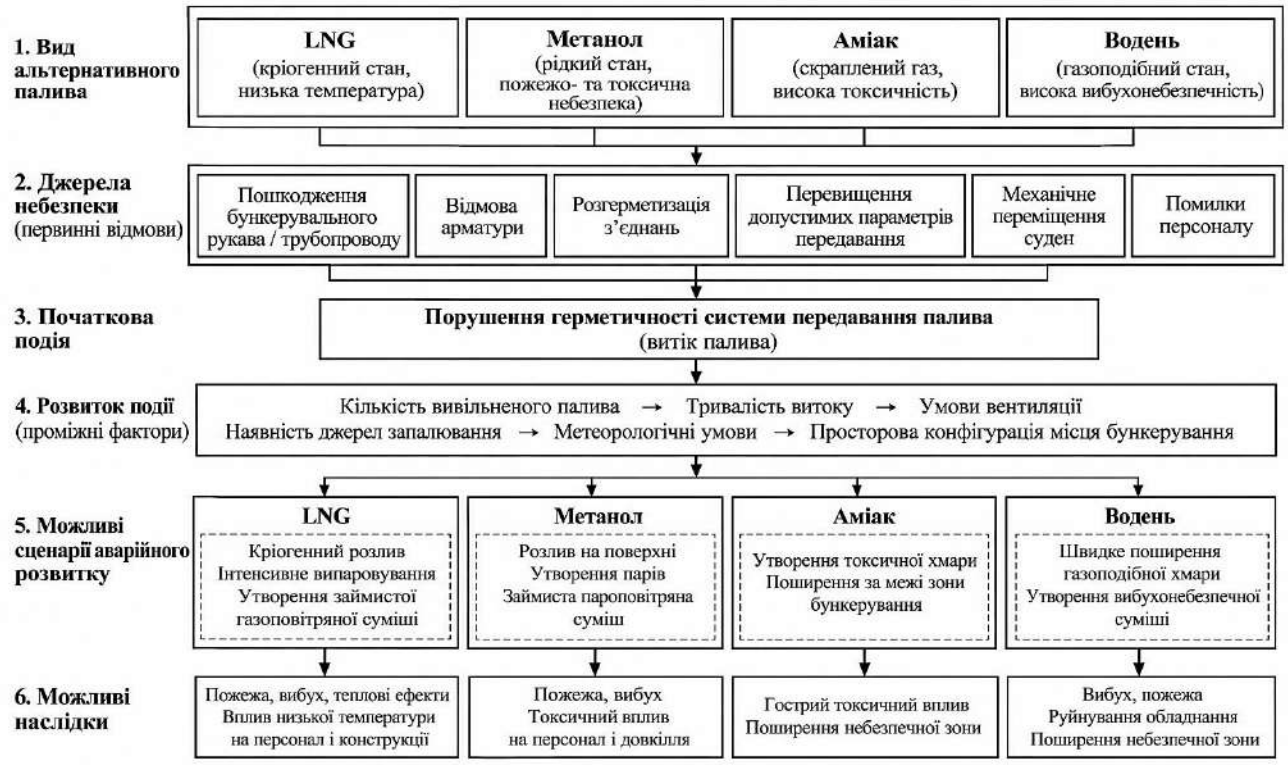


Рисунок 1 – Схема формування небезпек, розвитку аварійних сценаріїв та їх наслідків під час бункерування суден альтернативними видами палива

Як випливає з рис. 1, за однакової початкової розгерметизації ліній передавання характер аварійного процесу диктується типом палива. Для LNG характерними наслідками розгерметизації є утворення кріогенного розливу, інтенсивне випаровування та формування займистої газоповітряної суміші. За наявності джерела запалювання можливий розвиток пожежі або

інших небезпечних теплових і вибухових ефектів. Додатковим фактором є вплив низької температури на персонал, конструкції та елементи технологічного обладнання.

Для метанолу визначальними є пожежна небезпека та токсичний вплив у разі потрапляння палива на людину або утворення небезпечної концентрації парів. Розлив метанолу може поширюватися по відкритих поверхнях, а характер наслідків значною мірою залежить від кількості вивільненого палива, умов локалізації розливу та наявності джерела запалювання.

Аміак формує інший профіль ризику, в якому першочергового значення набуває токсичний вплив. У разі розгерметизації можливе утворення та поширення токсичної хмари за межі безпосередньої зони бункерування. Масштаб небезпечної зони при цьому залежить від параметрів витоку, тривалості вивільнення, метеорологічних умов і просторової конфігурації місця проведення операції, рис. 2.

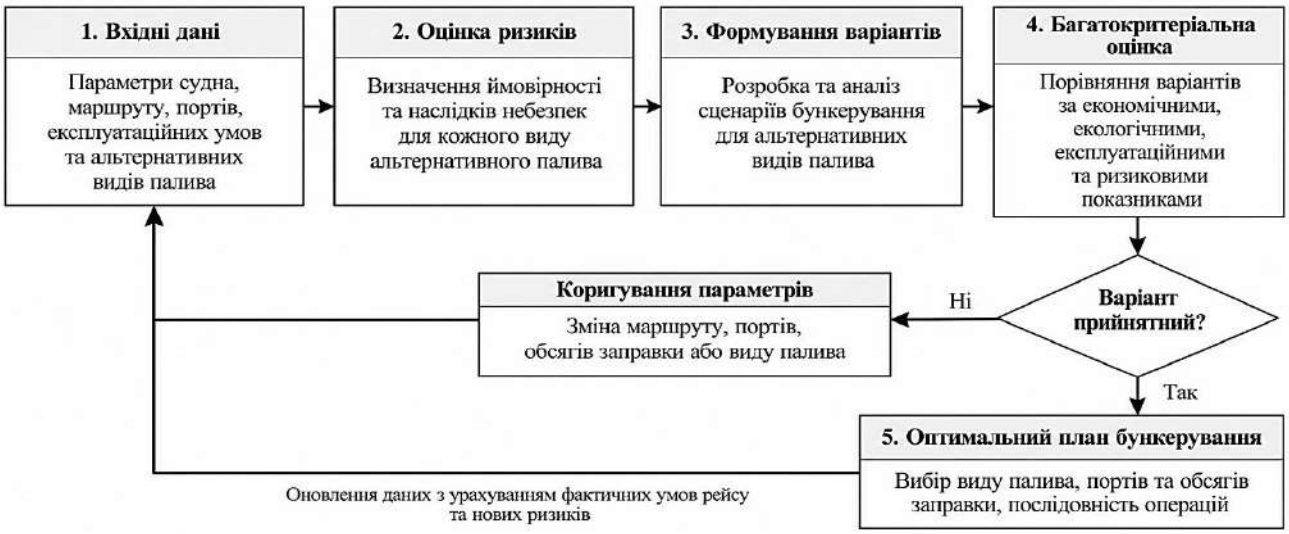


Рисунок 2 – Схема оцінки та вибору оптимального плану бункерування

Для водню характерні висока займистість, здатність до стрімкого дифузійного поширення після розгерметизації та утворення

вибухонебезпечних сумішей з повітрям. Траєкторія розвитку аварійного сценарію залежить від технології зберігання, інтенсивності викиду, ефективності систем вентиляції та ймовірності активації джерела займання. Отже, попри відмінності у фізико-хімічних параметрах розглянутих видів палива, загальна архітектура формування ризику бункерування описується універсальною послідовністю: від джерела небезпеки до розвитку аварійного сценарію.

Для систематизації встановлених відмінностей доцільно узагальнити характерні небезпеки та можливі сценарії для кожного виду альтернативного палива (табл. 1).

Таблиця 1 – Систематизація характерних небезпек бункерування альтернативними паливами

Вид палива	Характерна небезпека	Початкова подія	Можливий розвиток сценарію	Основні наслідки
LNG	кріогенна, пожежо- та вибухонебезпека	порушення герметичності	розлив - випаровування - утворення займистої суміші - запалювання	термічний вплив, пошкодження обладнання і конструкцій, травмування персоналу
Метанол	пожежна, токсична	витік або розлив	поширення рідини/парів - контакт або запалювання	пожежа, токсичний вплив, забруднення
Аміак	токсична, хімічна	викид рідкої або газоподібної фази	випаровування - формування та поширення токсичної хмари	ураження персоналу, поширення небезпечної зони
Водень	пожежо- та вибухонебезпека	витік	поширення - утворення займистої суміші - запалювання	пожежа, тепловий вплив, вибухові ефекти

Наведена систематизація показує, що відмінності між альтернативними паливами найбільш чітко проявляються на етапі розвитку аварійного сценарію та формування його наслідків. Водночас початкові умови виникнення небезпечної події значною мірою визначаються спільними для бункерувальних операцій факторами, і це дозволяє перейти від окремого

розгляду LNG, метанолу, аміаку та водню до узагальнення факторів, що впливають на рівень ризику незалежно від конкретного виду палива.

Такі фактори доцільно розподілити на п'ять основних груп: *технічні, технологічні, організаційні, зовнішні та паливоспецифічні*. Так, технічна група характеризує стан бункерувального обладнання, трубопроводів, арматури, з'єднань, систем контролю та аварійного відключення. Технологічні фактори визначаються параметрами виконання операції, зокрема інтенсивністю передавання палива, тиском, температурою, тривалістю операції та послідовністю технологічних дій.

Для переходу від аналізу окремих аварійних сценаріїв до системного управління ризиком доцільно враховувати не лише послідовність розвитку небезпечної події, але й взаємозв’язок факторів ризику із запобіжними та захисними заходами. Узагальнену структуру такого взаємозв’язку наведено на рис. 3.

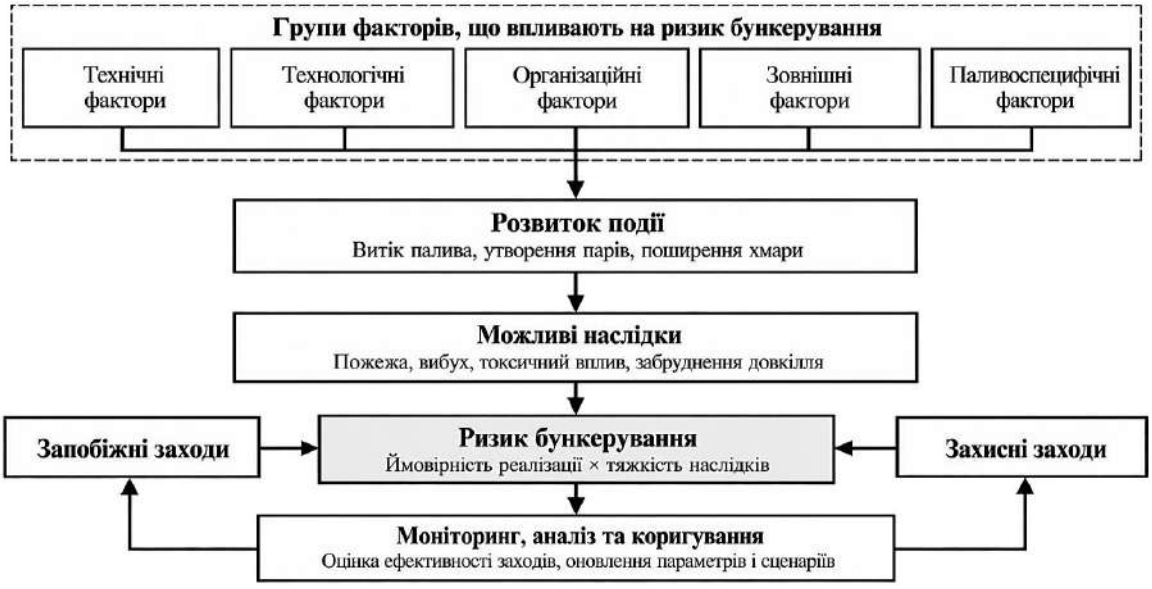


Рисунок 3 – Структурна схема формування та управління ризиком під час бункерування суден альтернативними видами палива

Як видно з рис. 3, ризик бункерування формується як результат послідовної трансформації вихідних факторів у небезпечну подію та її можливі наслідки. Технічні, технологічні, організаційні, зовнішні та паливоспецифічні фактори впливають на характер розвитку витоку, утворення парів і поширення небезпечної хмари і подальший розвиток події може призводити до пожежі, вибуху, токсичного впливу або забруднення довкілля, а рівень ризику визначається поєднанням імовірності реалізації відповідного сценарію та тяжкості його наслідків.

Організаційні фактори охоплюють підготовку персоналу, розподіл відповідальності, виконання встановлених процедур, зв'язок між учасниками операції та готовність до реагування на аварійну ситуацію. До зовнішніх факторів належать гідрометеорологічні умови, взаємне положення суден, особливості акваторії та просторові обмеження місця бункерування. Паливоспецифічні фактори визначаються фізико-хімічними властивостями конкретного палива та обумовлюють характер розвитку події після його неконтрольованого вивільнення.

При цьому зазначені групи факторів не слід розглядати ізольовано. Технічна відмова може набувати критичного значення лише за певного режиму передавання палива, несприятливих зовнішніх умов або несвоєчасних дій персоналу. Аналогічно наслідки однакового за масштабом витоку можуть істотно відрізнятися залежно від властивостей палива, умов вентиляції, наявності джерел запалювання та можливості локалізації вивільненої речовини. Таким чином, ризик бункерування формується внаслідок *поєднання факторів різної природи*, а не дії окремого небезпечного чинника.

На цій основі процес формування ризику доцільно представляти як взаємодію трьох складових: умов виникнення небезпечної події, умов розвитку аварійного сценарію та факторів, що визначають тяжкість його

наслідків. Такий поділ дозволяє визначити, на якому етапі можуть бути реалізовані запобіжні або захисні заходи та на яку складову аварійного процесу вони безпосередньо впливають, рис. 4.



Рисунок 4 – Схема формування ризику під час бункерування альтернативними паливами

Представлена схема показує, що формування ризику має послідовний характер, однак вплив окремих факторів не обмежується одним етапом аварійного процесу. Зокрема, зовнішні умови та властивості палива можуть одночасно визначати умови виникнення події, характер її подальшого розвитку та тяжкість наслідків. Це обумовлює необхідність диференціації заходів управління ризиком залежно від етапу, на якому реалізується їх захисна функція.

Висновки. У роботі систематизовано характерні небезпеки, що виникають під час бункерування суден зрідженим природним газом, метанолом, аміаком та воднем, встановлено, що за наявності спільних причин виникнення небезпечних подій подальший розвиток аварійних сценаріїв істотно залежить від фізико-хімічних властивостей конкретного виду палива, що визначає відмінності у характері поширення небезпечної

речовини, можливих сценаріях пожежі, вибуху або токсичного впливу та масштабі відповідних наслідків.

Фактори формування ризику бункерування систематизовано за п'ятьма групами де показано, що їх вплив має взаємопов'язаний характер, а рівень ризику визначається не окремим фактором, а їх поєднанням на різних етапах розвитку небезпечної події.

Запропоновано структурне представлення процесу формування ризику, яке встановлює взаємозв'язок між вихідними факторами, умовами виникнення небезпечної події, розвитком аварійного сценарію та тяжкістю його наслідків. Такий підхід дозволяє диференціювати запобіжні та захисні заходи залежно від етапу аварійного процесу, на якому вони реалізуються, та може бути використаний як основа для подальшого оцінювання ризику конкретних бункерувальних операцій.

Список літератури

1. Barone, G., Buonomano, A., Del Papa, G., Giuzio, G. F., Maka, R., Palombo, A., & Russo, G. (2026). Pathways to maritime decarbonisation: Analysing alternative fuels across vessel classes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *229*, 116671. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116671

2. Shi, J., Mao, X., Li, Y., & Yuen, K. F. (2026). A systematic review of ammonia fuel supply chain readiness for maritime decarbonisation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *236*, 116965. https://doi.org/10.1016/j.rser.2026.116965

3. Zhang, Y., Chen, P., Wu, D., Hao, X., Yang, T., & Cairns, A. (2025). Advancing maritime decarbonisation: Design and optimisation of ammonia-fuelled propulsion systems. *Journal of Cleaner Production*, *535*, 147145. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.147145

4. Yang, X., & Yan, R. (2026). Deployment-oriented validation of vessel energy efficiency inference for maritime decarbonisation policy. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *161*, 105599. https://doi.org/10.1016/j.trd.2026.105599

5. Sheikh, W., Reza Emad, G., Rabiul Islam, T., & Abdussamie, N. (2026). Aligning human capital with maritime decarbonisation, digitalisation, and automation strategies: A conceptual framework. *Transport Policy*, *188*, 104375. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2026.104375

6. Todorović, N., Jovanović, I., Fan, A., & Vladimir, N. (2026). From potential to deployment: A system-level review of electrofuels for maritime decarbonisation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *91*, 105113. https://doi.org/10.1016/j.seta.2026.105113

7. Rofifah, T. M., Jeong, B., Lee, S. B., Kang, S. P., Choi, M. W., Park, J. M., & Ha, S. (2026). Integrated techno-economic assessment of alternative marine fuels under FuelEU maritime, EU ETS, and an IMO net-zero framework scenario. *Ocean Engineering*, *362*, 126334. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.126334

8. Fadaie, S., Thornley, P., & Souppez, J. (2025). A systematic review of technologies, measures, and CO2 emission reduction potential for maritime transport decarbonisation. *Advances in Applied Energy*, *20*, 100255. https://doi.org/10.1016/j.adapen.2025.100255

9. Kian, H., Galimova, T., & Breyer, C. (2026). Review of maritime defossilisation regarding regulation, energy efficiency, alternative fuels, and technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *234*, 116895. https://doi.org/10.1016/j.rser.2026.116895

10. Styhre, L., Rogerson, S., & Santén, V. (2026). Sustainable shipping on the horizon: Environmental requirements and institutional pressures in

maritime decarbonisation. *Research in Transportation Business & Management*, *67*, 101687. https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2026.101687

11. Triantoro, W., Mangan, J., & Rietig, K. (2026). Towards maritime transport decarbonisation in developing countries: A systematic literature review. *Marine Policy*, *185*, 106989. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2025.106989

12. Gould, A., & Finiguerra, A. (2025). Integrated modelling and ontologies of energy futures: The decarbonisation of maritime transport. *Energy Research & Social Science*, *127*, 104195. https://doi.org/10.1016/j.erss.2025.104195

13. Galimova, T., Lagouvardou, S., Kian, H., & Breyer, C. (2025). Comparing sustainable fuel adoption in the energy transition for maritime and aviation transport. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *224*, 116124. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116124

14. Law, L. C., Tsoulakos, N., Meristoudi, E., Theodossopoulos, P., & Mastorakos, E. (2026). Data-driven decarbonisation strategies for ships, part 1: Technical feasibility and emissions modelling. *Energy Reports*, *16*, 109610. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2026.109610

15. Malmborg, F. V. (2023). Advocacy coalitions and policy change for decarbonisation of international maritime transport: The case of FuelEU maritime. *Maritime Transport Research*, *4*, 100091. https://doi.org/10.1016/j.martra.2023.100091

16. Melnyk, O. M., Shumylo, O. M., Bulgakov, M. P., Voronenko, S. V., Onishchenko, O. A., Korobkova, O. M., Shapovalova, I. O., & Panteleieva, O. S. (2025). Integrated multicriteria analysis of hydrogen and ammonia as alternative marine fuels in the maritime transport decarbonization process. Journal of Chemistry and Technologies, 33(4), 1216–1231. https://doi.org/10.15421/jchemtech.v33i4.335825

17. Bulgakov, M., Melnyk, O., & Ternovsky, V. (2025). Stages Of Alternative Fuels And Eco-Innovation In Maritime Transport. *Municipal Economy of Cities*, *1*(189), 447–454. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-447-454

18. Melnyk, O., Bulgakov, M., Ocheretna, V., & Varlan, T. (2025). Hydrogen and ammonia as next-generation marine fuels in line with IMO 2050. Journal of Mechanical Engineering and Transport, 11(1), 32-42. https://doi.org/10.63341/vjmet/1.2025.32

References

1. Barone, G., Buonomano, A., Del Papa, G., Giuzio, G. F., Maka, R., Palombo, A., & Russo, G. (2026). Pathways to maritime decarbonisation: Analysing alternative fuels across vessel classes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *229*, 116671. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116671

2. Shi, J., Mao, X., Li, Y., & Yuen, K. F. (2026). A systematic review of ammonia fuel supply chain readiness for maritime decarbonisation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *236*, 116965. https://doi.org/10.1016/j.rser.2026.116965

3. Zhang, Y., Chen, P., Wu, D., Hao, X., Yang, T., & Cairns, A. (2025). Advancing maritime decarbonisation: Design and optimisation of ammonia-fuelled propulsion systems. *Journal of Cleaner Production*, *535*, 147145. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.147145

4. Yang, X., & Yan, R. (2026). Deployment-oriented validation of vessel energy efficiency inference for maritime decarbonisation policy. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *161*, 105599. https://doi.org/10.1016/j.trd.2026.105599

5. Sheikh, W., Reza Emad, G., Rabiul Islam, T., & Abdussamie, N. (2026). Aligning human capital with maritime decarbonisation, digitalisation, and

automation strategies: A conceptual framework. *Transport Policy*, *188*, 104375. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2026.104375

6. Todorović, N., Jovanović, I., Fan, A., & Vladimir, N. (2026). From potential to deployment: A system-level review of electrofuels for maritime decarbonisation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *91*, 105113. https://doi.org/10.1016/j.seta.2026.105113

7. Rofifah, T. M., Jeong, B., Lee, S. B., Kang, S. P., Choi, M. W., Park, J. M., & Ha, S. (2026). Integrated techno-economic assessment of alternative marine fuels under FuelEU maritime, EU ETS, and an IMO net-zero framework scenario. *Ocean Engineering*, *362*, 126334. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.126334

8. Fadaie, S., Thornley, P., & Souppez, J. (2025). A systematic review of technologies, measures, and CO2 emission reduction potential for maritime transport decarbonisation. *Advances in Applied Energy*, *20*, 100255. https://doi.org/10.1016/j.adapen.2025.100255

9. Kian, H., Galimova, T., & Breyer, C. (2026). Review of maritime defossilisation regarding regulation, energy efficiency, alternative fuels, and technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *234*, 116895. https://doi.org/10.1016/j.rser.2026.116895

10. Styhre, L., Rogerson, S., & Santén, V. (2026). Sustainable shipping on the horizon: Environmental requirements and institutional pressures in maritime decarbonisation. *Research in Transportation Business & Management*, *67*, 101687. https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2026.101687

11. Triantoro, W., Mangan, J., & Rietig, K. (2026). Towards maritime transport decarbonisation in developing countries: A systematic literature review. *Marine Policy*, *185*, 106989. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2025.106989

12. Gould, A., & Finiguerra, A. (2025). Integrated modelling and ontologies of energy futures: The decarbonisation of maritime transport. *Energy*

Research & Social Science, *127*, 104195. https://doi.org/10.1016/j.erss.2025.104195

13. Galimova, T., Lagouvardou, S., Kian, H., & Breyer, C. (2025). Comparing sustainable fuel adoption in the energy transition for maritime and aviation transport. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *224*, 116124. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116124

14. Law, L. C., Tsoulakos, N., Meristoudi, E., Theodossopoulos, P., & Mastorakos, E. (2026). Data-driven decarbonisation strategies for ships, part 1: Technical feasibility and emissions modelling. *Energy Reports*, *16*, 109610. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2026.109610

15. Malmborg, F. V. (2023). Advocacy coalitions and policy change for decarbonisation of international maritime transport: The case of FuelEU maritime. *Maritime Transport Research*, *4*, 100091. https://doi.org/10.1016/j.martra.2023.100091

16. Melnyk, O. M., Shumylo, O. M., Bulgakov, M. P., Voronenko, S. V., Onishchenko, O. A., Korobkova, O. M., Shapovalova, I. O., & Panteleieva, O. S. (2025). Integrated multicriteria analysis of hydrogen and ammonia as alternative marine fuels in the maritime transport decarbonization process. Journal of Chemistry and Technologies, 33(4), 1216–1231. https://doi.org/10.15421/jchemtech.v33i4.335825

17. Bulgakov, M., Melnyk, O., & Ternovsky, V. (2025). Stages Of Alternative Fuels And Eco-Innovation In Maritime Transport. *Municipal Economy of Cities*, *1*(189), 447–454. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-447-454

18. Melnyk, O., Bulgakov, M., Ocheretna, V., & Varlan, T. (2025). Hydrogen and ammonia as next-generation marine fuels in line with IMO 2050. Journal of Mechanical Engineering and Transport, 11(1), 32-42. https://doi.org/10.63341/vjmet/1.2025.32