УДК 629.54:662.767:504.06 **DOI: 10.33042/2522-1809-2025-1-189-447-454**

М.П. Булгаков, О.М. Мельник, В.Б. Терновський

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

ЕТАПИ ВПРОВАДЖЕННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ПАЛИВА ТА ЕКОІННОВАЦІЙ У МОРСЬКОМУ ТРАНСПОРТІ

Ця стаття аналізує перспективи впровадження альтернативного палива та екологічних технологій у морському транспорті. Розглядаються шляхи досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року, акцентуючи увагу на зрідженому природному газі, метанолі, біопаливі та водні. Запропонована модель враховує екологічні, економічні й інфраструктурні аспекти.

Ключові слова: *альтернативне паливо, екологія, судноплавство, природний газ, метанол, біопаливо, декарбонізація, моделювання*

Постановка проблеми

У рамках глобальної відданості чистому транспорту провідні країни світу взяли на себе зобов’язання досягти кліматичної нейтральності до 2050 року. Одним із проміжних завдань є скорочення викидів парникових газів на 55 % до 2030 року. Важливою частиною цієї ініціативи є морський транспорт, який десятиліттями залежав від викопного палива. Його трансформація є ключовим елементом для досягнення кліматичних цілей міжнародної спільноти.

На шляху до цього активно досліджуються та впроваджуються технології з низьким рівнем викидів, низьковуглецеві або альтернативні види палива, а також інші енергоефективні рішення. Наприклад, використання альтернативних видів палива, таких як зріджений природний газ (ЗПГ), значно знижує ризик екологічних наслідків, пов’язаних із судноплавством, зменшуючи ймовірність розливів та обсяги шкідливих викидів у навколишнє середовище. Це значно наближає морський сектор до екологічно стійкого майбутнього.

Морський транспорт є одним з джерел забруднення навколишнього середовища. Важке паливо, яке є найпопулярнішим паливом для суден, містить в середньому 3,5 % сполук сірки. Для порівняння, вміст домішок сірки в бензині та дизельному паливі екологічного класу Євро-5 не може перевищувати 0,001 % від загальної маси продукту. Але резолюція IMO Sulfur 2020 , прийнята Міжнародною морською організацією, яка регламентує вміст сірчистих компонентів у паливах для річкового і морського транспорту - не більше 0,5 %, докорінно змінює ситуацію на ринку нафтопродуктів для судноплавної галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Роботи [1, 2] присвячені аналізу економічної конкурентоспроможності альтернативних суднових палив в умовах нової нормативної бази та впливу альтернативних палив на оптимальну економічну швидкість судна. У роботах [3-5] розглянуто виробництво вуглецево-нейтрального морського палива, варіанти заправки в морському секторі та життєвий цикл оцінки викидів парникових газів. У роботах [6-8, 10] розглянуто відстеження викидів морського палива, а також досягнення в дослідженнях альтернативних видів морського палива та майбутні тенденції. У статті [9] проаналізовано енергоспоживання нової системи ре-зрідження, інтегрованої з системою постачання палива (СПП) для судна-носія зрідженого природного газу, у порівнянні з традиційними системами. У роботі [11] досліджено концепцію водню як суднового палива і можливість перенесення досвіду використання ЗПГ на водневі системи. У роботах [12-14] розглянуто застосування альтернативного морського енергопостачання портів, прогалини в знаннях про офшорні гібридні електростанції на основі паливних елементів та альтернативних видів палива, а також останні тенденції використання екологічно чистого аміаку як енергоносія в морській індустрії. Потенційні альтернативні паливні шляхи та використання альтернативних видів палива для декарбонізації морського транспорту досліджено в роботах [15,16]. Питання, пов'язані з ефективним забезпеченням безпеки процесу експлуатації суден в різних умовах і під впливом різних факторів, розглянуті в роботах [17, 18]. Додаткові питання щодо майбутнього морського палива, порівняння та перспективи, а також дослідження альтернативних видів палива та

© М.П. Булгаков, О.М. Мельник, В.Б. Терновський

технологій для більш екологічного судноплавства досліджуються в [19, 20].

Таким чином, у зв'язку зі зростаючими потребами у використанні низьковуглецевих джерел енергії, альтернативні види палива набули широкого розповсюдження. Представлені нові джерела енергії також підпадають під вимоги до традиційних видів палива, що використовуються та представлені на енергетичному ринку, а саме: якість, надійність та сталість, і становлять інтерес для подальшого всебічного вивчення.

Мета статті

Полягає у визначенні перспектив впровадження альтернативних видів палива та енергоефективних технологій у морському транспорті з метою зниження викидів парникових газів, покращення екологічних показників суден і досягнення кліматичних цілей міжнародної спільноти.

Виклад основного матеріалу

1. Огляд існуючих альтернативних видів палива для морської галузі

Морський транспорт споживає приблизно 11% світового обсягу палива, що еквівалентно близько 10 мільйонам барелів на день. Високий рівень споживання палива суднами виправдовує масштабне виробництво нафтопродуктів, розширення паливної інфраструктури та формування довгострокової стратегії енергозабезпечення, що згодом відбивається і на інших секторах економіки.

Після набуття чинності заборони на використання важкого палива у 2024 році головним судновим паливом залишиться дизель. Це створює передумови для переосмислення підходів у морському транспорті, що дає галузі можливість активніше адаптуватися до нових екологічних стандартів та розглянути доцільність використання альтернативних джерел енергії.

Окремою проблемою залишається вплив можливих розливів альтернативних палив, що вимагає ретельного вивчення в лабораторних і польових умовах, особливо за низьких температур та сильного вітру. Не менш важливим є дослідження довготривалого впливу змішаних видів альтернативного палива на водні екосистеми, що допоможе оцінити їхню безпеку для довкілля та ефективність у перспективі. Основні види альтернативних суднових палив представлені на рис.1., а їх недоліки та переваги у табл. 1.

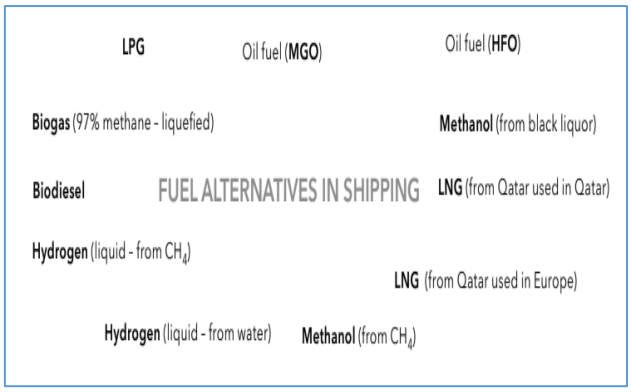

Рис.1. Основні види альтернативного суднового палива

Таблиця 1

Переваги та недоліки палива LNG

Переваги використання скрапленого природного газу	Недоліки використання зрідженого природного газу
Найчистішим паливом є скраплений природний газ, оскільки він виробляє найменшу кількість парникових газів	ЗПГ має вищий питомий вміст енергії, ніж важке паливо, але вміст енергії в одиниці об'єму становить лише 43 % від вмісту енергії у високосірчистому важкому паливі. Тому паливні танки займають у 3-4 рази більше місця, ніж на суднах, що працюють на звичайному паливі
ЗПГ використовується як паливо для суден з початку 2000-х років, тому технологія вже досить розвинена, а на ринку є багато постачальників, що допомагає утримувати ціни на нього на низькому рівні	Проблеми з бункеруванням. Загальне небажання впроваджувати двигуни, що працюють на ЗПГ у судноплавстві частково пояснюється логістичними труднощами. Зріджений природний газ для суднових двигунів досі можна знайти лише в обмеженій кількості портів по всьому світу, що не влаштовує більшість учасників ринку
Поршневі двигуни, газові турбіни та витратні матеріали до них, а також спеціальні кріогенні паливні системи для ЗПГ виробляються в промислових масштабах і є у вільному доступі	Часто судна мають довгі маршрути, в яких наступний пункт не визначений заздалегідь, а це означає, що паливо має бути доступне в будь-якому порту. Тому компанії часто займають вичікувальну позицію щодо нових технологій

Безумовно, для прийняття рішення щодо вибору пріоритетного виду палива для міжнародного судноплавства необхідні більш точні та ґрунтовні дослідження з оцінки екологічного сліду від використання альтернативних видів палива, починаючи від видобутку сировини і закінчуючи викидами.

На сьогоднішній день ЗПГ і важке паливо обігнали всіх своїх конкурентів за ціною, але це не означає, що ЗПГ ще довго залишатиметься лідером. Нещодавнє подорожчання газу неминуче змусить судновласників замислитися про доцільність використання газового палива. Слід зазначити, що однією з проблем, яка досі не вирішена, є бункерування суден.

2. Аналіз впливу на навколишнє середовище та вартості альтернативних видів палива

За оцінками DNV GL, використання зрідженого природного газу (ЗПГ) у морському транспорті дозволяє суттєво знизити рівень викидів парникових газів, серед яких основними є водяна пара, вуглекислий газ (CO2), метан та озон. Однак основною екологічною проблемою ЗПГ залишається викид незгорілого метану, який має в 20 разів сильніший парниковий ефект, ніж CO2. Це ставить під сумнів довгострокову перспективу ЗПГ як екологічно безпечного палива, оскільки навіть незначний витік може значно впливати на кліматичні процеси.

Сучасні двопаливні двигуни, за твердженням виробників, мають значно кращі показники щодо скорочення викидів незгорілого метану, що дозволяє зменшити загальний рівень парникових газів у судноплавстві на 10-20%. Це робить ЗПГ ефективним перехідним паливом у процесі декарбонізації, але його застосування все ще потребує вдосконалення систем контролю витоків та покращення ефективності згоряння.

Поряд із ЗПГ дедалі більше уваги приділяється альтернативним видам палива, зокрема метанолу, водню та біопаливу. Метанол є перспективним варіантом через можливість використання в існуючих двигунах із мінімальними модифікаціями, проте його вуглецевий слід все ще вищий за традиційні суднові палива, такі як важке паливо (HFO) чи морський газойль (MGO). Біопаливо та відновлювані джерела енергії мають менший вплив на навколишнє середовище, але їх масове впровадження стримується високою вартістю виробництва та обмеженою інфраструктурою для бункерування.

Водень, особливо якщо він отриманий з відновлюваних джерел, має значний потенціал як екологічно чисте паливо. Його згоряння не супроводжується викидами CO?, але основним викликом залишається зберігання та транспортування. Рідкий водень потребує складних кріогенних систем через низьку енергетичну щільність і високу вибухонебезпечність.

Щодо викидів NOx, суднові двигуни внутрішнього згоряння циклу Отто, що працюють на ЗПГ або водні, відповідають стандартам Tier III без потреби в додаткових системах очищення вихлопних газів. Водночас дизельні двопаливні установки часто не відповідають цим вимогам і потребують доопрацювання.Наприклад, стандарт Tier III стосується обмеження викидів оксидів азоту (NOx) для суден, що використовують дизельні двигуни внутрішнього згоряння. Цей стандарт було запроваджено з метою зменшення впливу судноплавства на навколишнє середовище, зокрема забруднення повітря. Щоб відповідати стандарту Tier III, морські двигуни повинні використовувати різні технології для зменшення викидів NOx, такі як системи впорскування води для зниження температури згоряння, каталітичні нейтралізатори, системи рециркуляції вихлопних газів та інші. Для нових суден, побудованих після 1 січня 2016 року, які мають двигуни потужністю понад 130 кВт, відповідність Tier III є обов'язковою. Для суден, побудованих до 1 січня 2016 року, стандарт Tier III не є обов'язковим, але може застосовуватися на добровільній основі.

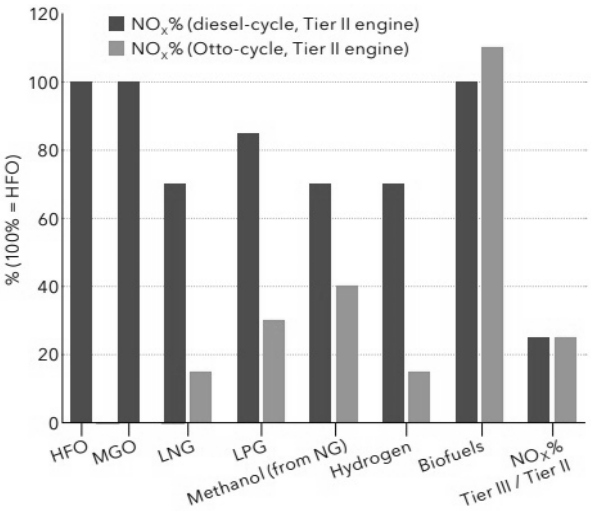

Рис.2. Викиди азоту від різних видів палива [19]

Ціна реалізації не є основним критерієм вибору тієї чи іншої технології, але ціна пального є таким критерієм. Вона залежить від кількох факторів, у тому числі важкопрогнозованих. Наприклад, за даними джерел, найнижча ціна за попереднє десятиліття спостерігається на HFO. Конкуренцію йому можуть скласти лише ЗПГ та скраплений газ. Ціна метанолу, виробленого з природного газу, є вищою, ніж у LNG. Біопаливо виробляється з біомаси

і традиційно дорожче за нафту марки Brent. Ці види палива, ймовірно, будуть конкурувати з ЗПГ у майбутньому.

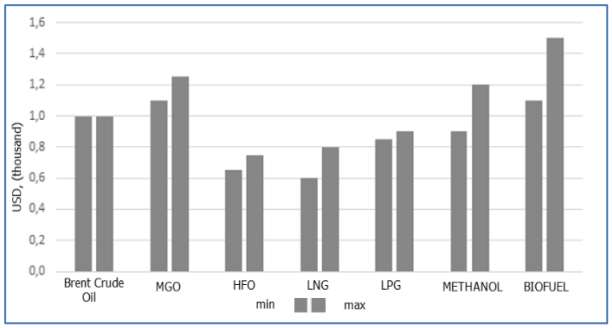

Рис.3. Якісна дисперсія цін на можливі види суднового палива [19]

Водень тут не розглядається, оскільки він набагато дорожчий за інші види палива. Він абсолютно неконкурентоспроможний на ринку з точки зору ціни. Він матиме шанс лише при значних субсидіях або високих податках на традиційне паливо. Говорячи про виробництво палива, варто зазначити, що всі види палива, окрім ЗПГ, потребують значних інвестицій, якщо буде прийнято рішення про масове використання того чи іншого виду палива. Виробництво ЗПГ значно перевищує потреби світового флоту в паливі, тому перехід на нього можливий вже сьогодні.

3. Багатофакторна математична модель аналізу альтернативних видів палива на морському транспорті

Для обґрунтування вибору оптимального палива в морському транспорті пропонується математична модель, яка враховує екологічну ефективність, економічну доцільність і доступність інфраструктури, та надає змогу формалізувати процес аналізу та мінімізувати вплив суб'єктивних чинників на прийняття рішень.

1. Цільова функція

Оптимальний вибір палива визначається на основі цільової функції C, яка являє собою зважену суму ключових критеріїв:

$$C = w_1 E + w_2 S + w_3 V, \tag{1}$$

де: E - екологічна ефективність, що характеризує зниження викидів забруднювачів; S - вартість палива на одиницю транспортної роботи (наприклад, тони вантажу на морську милю); V - доступність інфраструктури (логістика, кількість портів для бункерування); w_1, w_2, w_3 - вагові коефіцієнти, що визначають пріоритетність кожного критерію.

Значення коефіцієнтів w_i задають залежно від поставлених завдань: наприклад, пріоритет може бути надано мінімізації екологічного збитку або зниженню операційних витрат.

2. Екологічна ефективність

Екологічна ефективність (E) оцінюється на основі викидів від забруднювачів:

$$E = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i e_i, \tag{2}$$

де: e_i - викиди i-го забруднювача (наприклад, CO_2, NO_x, SO_x, CH_4); α_i - екологічна вага кожного забруднювача, що відображає його вплив на навколишнє середовище (наприклад, внесок у глобальне потепління або кислотні опади).

3. Вартість палива

Економічна ефективність (S) розраховується як сума вартості палива і витрат на інфраструктуру:

$$S = \frac{E_u}{C_f} + C_{\inf}, \tag{3}$$

де: C_f – вартість палива; E_u - питома енергетична щільність палива (кВт·г/т); $C_{\inf}$ - витрати на створення або використання інфраструктури (наприклад, танкерів для зберігання або портових потужностей).

4. Доступність інфраструктури

Цей критерій дає змогу враховувати географічну та логістичну доступність палива, що важливо для забезпечення стійкості ланцюгів поставок. Доступність (V) визначається за логістичними параметрами:

$$V = \frac{P_{\text{ports}}}{T_{\text{total}}}, \tag{4}$$

де: P_{ports} - кількість портів, що надають необхідну інфраструктуру для бункерування; T_{total} - загальна кількість портів на маршруті.

5. Оптимізація

Оптимальне паливо вибирають шляхом мінімізації цільової функції:

$$\begin{aligned} &\arg\min_f C(f) = \\ &= \arg\min_f \left[w_1 E(f) + w_2 S(f) + w_3 V(f) \right], \end{aligned} \tag{5}$$

Запропонована математична модель дає змогу об'єктивно оцінювати альтернативні види пального з урахуванням екологічних, економічних і логістичних чинників.

Включивши всі ключові аспекти вибору палива, об'єднуючи екологічні, економічні та логістичні критерії в єдину багатофакторну модель, узагальнена формула може мати такий вигляд:

$$C(f) = w_1\left(\sum_{i=1}^{n}\alpha_i e_i(f)\right) + w_2\left(\frac{E_u(f)}{C_f(f)} + C_{\inf}(f)\right) + \\ + w_3\left(\frac{T_{\text{total}}}{P_{\text{ports}}(f)}\right)^{-1} + w_4 R(f), \quad (6)$$

де: - C(f) — загальна вартість використання палива f (цільова функція);

w_1, w_2,w_3,w_4 - вагові коефіцієнти, що визначають пріоритетність відповідних критеріїв;

$\sum_{i=1}^{n}\alpha_i e_i(f)$ - екологічна ефективність, де $e_i(f)$ - викиди забруднювача i для палива f, а α_i - вага впливу забруднювача;

$\frac{E_u(f)}{C_f(f)} + C_{\inf}(f)$ - економічний критерій, що включає вартість палива $C_f(f)$, його питому енергетичну щільність $E_u(f)$ і витрати на інфраструктуру $C_{\inf}$ (f); $\frac{T_{\text{total}}}{P_{\text{ports}}(f)}$ - логістичний критерій, де $P_{\text{ports}}(f)$ - кількість портів із доступною інфраструктурою для палива f, а T_{total} - загальна кількість портів на маршруті;

$R(f)$ - додатковий ризик-фактор, що враховує специфічні ризики для палива f (наприклад, безпека зберігання, ймовірність витоків або нормативні обмеження).

Інтерпретація факторів моделювання наведена у табл. 2.

Наведена підсумкова формула дає змогу комплексно оцінювати різні типи палива, мінімізуючи $C(f)$, що дає змогу знаходити баланс між екологічними, економічними та логістичними параметрами для досягнення сталого та ефективного вибору палива.

На рис. 4 представлено порівняльну вартість різних видів палива в одиницях транспортної роботи. Такий аналіз охоплює ЗПГ, метанол, водень і біопаливо, що дає змогу оцінити економічну ефективність кожного виду пального в транспортних умовах.

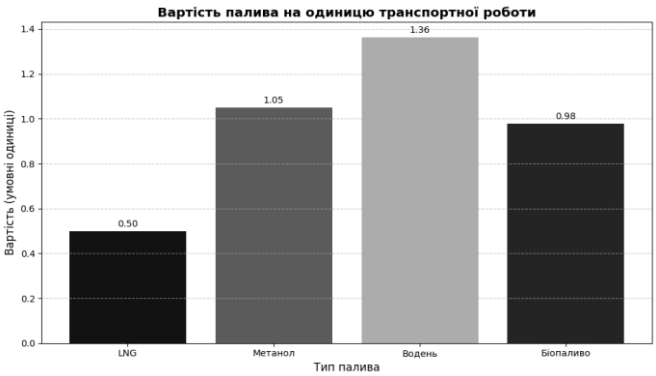

Рис. 4. Порівняльна вартість різних видів палива на одиницю транспортної роботи

Показано, що ЗПГ має найменшу вартість на одиницю транспортної роботи, що робить його економічно найвигіднішим варіантом. Порівняно з цим водень показує найвищу вартість, що представляє зростання витрат на виробництво і, як наслідок, на будівництво інфраструктури. Метанол і біопаливо займають проміжне становище, де економічна складова рівнозначна щодо всіх умов.

Таким чином екологічні проблеми та зростання цін на паливо призводять до необхідності пошуку нових рішень для судноплавства втім альтернатив не так багато. Водночас законодавство вже визначило умови для використання ЗПГ, а потім метанолу та біопалива. На думку експертів, розробка Кодексу МКУБ (Міжнародний кодекс з охорони суден, що використовують гази) для скрапленого газу і водню займе трохи часу. Для того, щоб відповідати вимогам IMO до 2050 року, необхідно буде не тільки перевести флот на інший, більш екологічний вид палива, а й розробити нові технології для скорочення викидів парникових газів з суден. Однією з найбільш

Таблиця 2

Інтерпретація факторів моделювання

Аспект	Вираз	Інтерпретація
Екологічний	$w_1\sum_{i=1}^{n}\alpha_i e_i(f)$	Відображає екологічний вплив палива. Вагові коефіцієнти α_i акцентують увагу на найбільш критичних забрудненнях (наприклад, CO_2, NO_x).
Економічний	$w_2\left(\frac{E_u(f)}{C_f(f)} + C_{\text{infra}}(f)\right)$	Зв'язує витрати на паливо ($C_f(f)$) з його ефективністю ($E_u(f)$) і витратами на інфраструктуру ($C_{\inf}(f)$).
Логістичний	$w_3\left(\frac{T_{\text{total}}}{P_{\text{ports}}(f)}\right)^{-1}$	Включає зворотну залежність: чим менше портів з інфраструктурою для палива ($P_{\text{ports}}(f)$), тим вища логістична складність.
Ризики	$w_4 R(f)$	Оцінює ризики, притаманні певному типу палива (f), наприклад, складність зберігання, безпека або нормативні обмеження.

перспективних технологій є використання паливних елементів, але вона все ще перебуває лише на стадії становлення. Будь-яка заборона є не тільки обмежуючим фактором, а й створює поле можливостей для якісного розвитку. Тому заборона HFO може стимулювати розвиток ринку альтернативних суднових видів палива, таких як ЗПГ і метанол. Це особливо важливо у світлі недостатньо вивченого впливу на навколишнє середовище нових сумішей нафтових палив. Використання альтернативних видів палива дозволить судновласникам забезпечити стійкість операцій у довгостроковій перспективі щодо забруднення атмосфери. Наслідки розливів нових видів палива, включаючи нафтове паливо з низьким вмістом сірки, недостатньо вивчені. Однак для кліматичних умов наслідки забруднення морської води від розливів є ключовим фактором. Використання дистилятного палива призведе до негайного збільшення експлуатаційних витрат, а встановлення скрубера може виявитися неправильною інвестицією, коли залишкове паливо заборонено, і інвестиції в обладнання не встигнуть окупитися. Ще більші ризики судновласники мають при будівництві нових суден, які потребують великих капіталовкладень. За сукупністю властивостей нафта і нафтопродукти не мають конкурентів на світовому ринку. Але регулярні інформаційні вкидання про те, що "нафта закінчується" і вуглецева залежність стимулюють спроби знайти заміну нафті як паливу і сировини для хімічної промисловості, тому найбільш очевидними кандидатами на таку заміну є етанол і метанол.

Отже, у дослідженні розглянуто можливості використання альтернативних видів палива на морському транспорті з точки зору екологічності, економічності та логістики. Представлена математична модель вибору палива враховує ключові параметри такі як екологічність, вартість, доступність інфраструктури та пов'язані з цим ризики - і забезпечує об'єктивність для вибору оптимального палива. Загальний висновок дослідження включає наступні результати: екологічний аспект; економічна ефективність; логістична інфраструктура. Алгоритм оптимізації та попереднього вибору забруднюючого палива на основі дослідженої функції мінімізації цільової функції може бути використаний для нашаровування рішення на додаткові критерії та стати практичним інструментом довгострокового планування альтернатив для нафтопереробної галузі. Робота сучасної глобальної економіки та логістики демонструє, що дослідження альтернативних видів палива в контексті вищезазначених параметрів потребує вивчення. Наприкінці слід зазначити, що лише комплексний підхід до вибору палива дозволить інтегрувати інноваційні технології та єдину глобалізовану логістичну систему, яка повинна слугувати сталому розвитку морського транспорту.

Висновки і перспективи

У рамках цього дослідження проаналізовано можливості використання альтернативних видів палива на морському транспорті з урахуванням екологічних, економічних і логістичних чинників. За розробленою математичною моделлю вибору пального можуть враховуватися такі ключові параметри, як екологічна ефективність, вартість пального, особливості інфраструктури та пов'язаний ризик. Це дає змогу ухвалювати об'єктивні та обґрунтовані рішення під час вибору найбільш оптимального виду палива. Використання альтернативних видів палива, таких як біоетанол, метанол, водень і біопаливо, дає змогу частково підвищити викиди парникових газів та інших забруднювачів, однак для кожного виду палива ступінь екологічної ефективності залежить від умов використання. Що стосується економічної доцільності, то вартість палива на одиницю транспортної роботи варіюється залежно від енергетичної щільності, інфраструктурних витрат і регіональної недоступності, що вимагає врахування таких факторів при довгостроковому плануванні. Доступність інфраструктури для зберігання і транспортування палива є важливим фактором, особливо для менш поширених видів палива, таких як метанол і водень, тому розвиток портової інфраструктури відіграє рішучу роль в цих інноваціях. Застосування розробленої моделі мінімізації цільової функції дає змогу адаптувати вибір палива відповідно до специфіки завдань та умов використання, при цьому балансуючи екологічну стійкість та економічну ефективність. Результати дослідження підкреслюють важливість комплексного підходу до вибору палива, що включає аналіз і врахування всіх чинників.

Майбутній розвиток альтернативних морських видів палива та технологій значною мірою буде залежати від розвитку інфраструктури, нормативно-правової бази та економічних стимулів. Перехід до більш стійких видів палива, таких як ЗПГ і біопаливо, триватиме як короткострокове рішення, що забезпечує нижчі викиди порівняно зі звичайним важким паливом. Майбутні наукові дослідження в галузі альтернативного морського палива та сталого судноплавства будуть зосереджені на кількох ключових напрямках, спрямованих на підвищення ефективності, зменшення впливу на навколишнє середовище та забезпечення економічної доцільності зелених технологій. Удосконалення в синтезі палива та методах виробництва, особливо для водню, аміаку

та біопалива, будуть важливими для зниження витрат та покращення масштабованості.

References

1. Solakivi, Tomi & Paimander, Aleksi & Ojala, Lauri. (2022). Cost competitiveness of alternative maritime fuels in the new regulatory framework. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 5(42), 112-118.*
2. Kouzelis, Konstantinos & Frouws, Koos & van Hassel, Edwin. (2022). Maritime fuels of the future: what is the impact of alternative fuels on the optimal economic speed of large container vessels. *Journal of Shipping and Trade.* (51), 305-310.
3. Carvalho, Francielle & Miranda Müller Drumond Casseres, Eduardo & Poggio, Matheus & Nogueira, Tainan & Fonte, Clarissa & Ken Wei, Huang & Portugal Pereira, Joana & Rochedo, Pedro & Szklo, Alexandre & Schaeffer, Roberto. (2021). *Prospects for carbon-neutral maritime fuels production in Brazil. Journal of Cleaner Production*. 2(29), 89-94
4. Franz, Sebastian & Campion, Nicolas & Shapiro-Bengtsen, Sara & Münster, Marie. (2022). Roadmap for sustainable fueling options in the maritime sector. *Conference: World Maritime Technology Conference 2022. 9(47), 415-420*
5. Huang, Jinjin & Fan, Hongjun & Xu, Xiangyang & Liu, Zheyu. (2022). Life Cycle Greenhouse Gas Emission Assessment for Using Alternative Marine Fuels: A Very Large Crude Carrier (VLCC) Case Study. *Journal of Marine Science and Engineering.* 4(38), 178-183
6. Heine, Dirk & GGde, Susanne & Dominioni, Goran. (2014). Unilaterally Removing Indirect Subsidies for Maritime Fuel. *SSRN Electronic Journal*. 6(45), 250-255
7. Livaniou, Styliani & Chatzistelios, Georgios & Lyridis, Dimitrios & Bellos, Evangelos. (2022). LNG vs. MDO in Marine Fuel Emissions Tracking. *Sustainability*. 8(50), 333-337.
8. Md Moshiul, Alam & Mohammad, Roslina & Hira, Fariha & Maarop, Nurazean. (2022). Alternative Marine Fuel Research Advances and Future Trends: A Bibliometric Knowledge Mapping Approach. *Sustainability*. 1(27), 55-60.
9. Seo, Youngkyun & Kim, Jintae & Park, Eunyoung & Lee, Jinkwang & Cho, Meangik & Han, Seongjong. (2022). Analysis of Energy Consumption of Novel Re-Liquefaction System Integrated with Fuel Supply System (FSS) for LPG-Fuelled LPG Carrier to Conventional Systems. *Energies*. 10(58), 512-518.
10. Nerheim, Ann Rigmor & Æsøy, Vilmar & Holmeset, Finn Tore. (2021). Hydrogen as a Maritime Fuel–Can Experiences with LNG Be Transferred to Hydrogen Systems?. *Journal of Marine Science and Engineering*. 3(40), 190-195.
11. Pekşen, Duygu & Alkan, Güler. (2018). Application of Alternative Maritime Power (AMP) Supply to Cruise Port. *Journal of ETA Maritime Science*. 6(44), 276-280.
12. Mallouppas, George & Ioannou, Constantina & Yfantis, Elias. (2022). A Review of the Latest Trends in the Use of Green Ammonia as an Energy Carrier in Maritime Industry. *Energies.* 5(37), 145-149.
13. Benet, Álvaro & Villalba-Herreros, Antonio & d'Amore-Domenech, Rafael & Leo, T.J.. (2022). Knowledge gaps in fuel cell-based maritime hybrid power plants and alternative fuels. *Journal of Power Sources.* 8(53), 367-372.
14. Christodoulou, Anastasia & Cullinane, Kevin. (2022). Potential alternative fuel pathways for compliance with the 'FuelEU Maritime Initiative'. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 9(49), 401-405.
15. Barberi, Salvatore & Campisi, Tiziana & Neduzha, Larysa. (2022). The role of cold ironing in maritime transport emissions. *AIP Conference Proceedings*. 2(30), 78-83.
16. Wang, Qiuwen & Zhang, Hu & Huang, Jiabei & Zhang, Pengfei. (2023). The use of alternative fuels for maritime decarbonization: Special marine environmental risks and solutions from an international law perspective. *Frontiers in Marine Science*. 7(46), 289-293.
17. Melnik, O., Onishchenko, S., Onishchenko, O., Shumilo, O., Voloshin, A., Ocheretna, V., Fedorenko, O. (2024). Research into the development of alternative types of fires and technologies in maritime transport. *Studies in Systems, Decision and Control*, 4(39), 13–21.
18. Ship fuel of the future. Comparison and prospect. Online source. Available at: https://sudostroenie.info/novosti/23327.html
19. Alternative fuels and technologies for greener shipping (2018) DNV GL. Summary of an assessment of selected alternative fuels and technologies. Online source. Available at: https://www.dnv.com
20. Maritime Safety Agency (2022). Update on potential of biofuels in shipping, EMSA, Lisbon. Online source. Avaiable at https://www.emsa.europa.eu/publications/reports/item/4834-update-on-potential-of-biofuels-for-shipping.html

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Малаксіано М.О. Одеський національний морський університет, Україна.

Автор: БУЛГАКОВ Микола Петрович
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки
Одеський національний морський університет
E-mail – npbulgakov2@gmail.com
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7172-8678

Автор: МЕЛЬНИК Олексій Миколайович

доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки
Одеський національний морський університет
E-mail – m.onmu@ukr.net
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9228-8459

Автор: ТЕРНОВСЬКИЙ Валентин Борисович, *доктор технічних наук, професор, професор кафедри навігації та керування судном*
Одеський національний морський університет
E-mail – ternovskyvb@gmail.com
ID ORCID https://orcid.org/0000-0002-4402-4157

STAGES OF ALTERNATIVE FUELS AND ECO-INNOVATION IN MARITIME TRANSPORT

M. Bulgakov, O. Melnyk, V. Ternovsky
Odesa National Maritime University, Ukraine

This study examines the phased implementation of alternative fuels and eco-innovations in maritime transport, aligning with global objectives to achieve climate neutrality by 2050. The authors analyze the environmental impact of shipping and the necessity of transitioning to low-carbon energy sources, specifically liquefied natural gas (LNG), methanol, biofuels, and hydrogen. The study evaluates the advantages and disadvantages of these fuels, considering their economic viability, infrastructure readiness, and environmental implications.

A key focus is on reducing greenhouse gas emissions, including CO_2, NOx, and SOx, while assessing the broader ecological consequences of alternative fuels on marine ecosystems. The paper introduces a multifactor mathematical model that objectively determines the optimal fuel choice based on environmental, economic, and logistical criteria. The findings highlight that while LNG is currently the most accessible and widely used alternative fuel, concerns about methane slip raise questions about its long-term sustainability. Additionally, the study investigates the operational efficiency of alternative fuels and the feasibility of retrofitting existing vessels to accommodate cleaner energy solutions.

Hydrogen and methanol are identified as promising future energy sources, yet their large-scale adoption is constrained by high production costs, storage challenges, and a lack of necessary infrastructure. Despite these limitations, ongoing advancements in hydrogen fuel cells and green methanol production could accelerate their integration into the maritime industry. The study also discusses the impact of alternative fuels on maritime safety, the need for engine modifications, and the expansion of refueling facilities at global ports. Furthermore, the research highlights the importance of developing hybrid propulsion systems that combine multiple alternative fuels to optimize efficiency and minimize emissions.

The research results indicate that achieving a transition to sustainable maritime transport requires a comprehensive strategy, integrating technological advancements, regulatory policies, and substantial investments in fuel infrastructure. The authors emphasize the significance of international collaboration and policy incentives in promoting the adoption of environmentally friendly energy sources within the maritime industry. Additionally, the paper underlines the necessity of continuous monitoring of fuel performance, life-cycle assessments, and further refinement of predictive models to ensure the long-term success of alternative fuel adoption in shipping.

Keywords: *alternative fuels, maritime transport, liquefied natural gas, methanol, hydrogen, decarbonization*