

МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.5.064

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2025.2-25.05>

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА НОРМАТИВНА БАЗА ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ НА МОРСЬКОМУ ТРАНСПОРТІ

М.П. Булгаков¹, О.М. Мельник², І.О. Пуляєв³

¹к. т. н., доцент, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-7172-8678

²д. т. н., професор, професор кафедри судноводіння і морської безпеки,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0001-9228-8459

³старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-0592-032X

Анотація

Вступ. Проблема енергоефективності морського транспорту набуває дедалі більшої актуальності в умовах посилення міжнародного екологічного регулювання та зростання вартості енергоресурсів. Судноплавна галузь відіграє фундаментальну роль у глобальній економіці, забезпечуючи основні обсяги міжнародних перевезень, проте залишається одним із помітних джерел викидів парникових газів, зокрема вуглекислого газу (CO₂), оксидів азоту (NO_x) та сірки (SO_x). У відповідь на ці виклики міжнародні організації, зокрема Міжнародна морська організація (ІМО), запроваджують систему технічних і операційних стандартів, які мають забезпечити поступове зниження впливу морських перевезень на довкілля. **Мета.** Метою даного дослідження є системний аналіз сучасних технологій, нормативно-правових вимог та методів прогнозного оцінювання, що можуть бути застосовані для підвищення енергоефективності в морському транспорті. Особливу увагу зосереджено на впливі міжнародних регуляторних ініціатив, зокрема таких як EEDI, SEEMP, EEOI, а також на технологічних інноваціях – від цифрового моделювання до впровадження альтернативних видів палива й адаптивних систем енергоменеджменту. **Результати.** Проведений аналіз свідчить, що поєднання цифрових технологій, передових систем керування та альтернативного енергозабезпечення може істотно знизити обсяги споживання палива і відповідні викиди в атмосферу. Запровадження цифрових двійників і систем машинного навчання виявилось ефективним для підвищення точності прогнозування витрат енергії та виявлення резервів оптимізації. Водночас, хоча впровадження

таких видів палива, як скраплений природний газ, метанол чи водень, потребує значних капітальних інвестицій, вони розглядаються як перспективні напрями декарбонізації галузі. **Висновки.** Результати даного дослідження підтверджують, що інтегрований підхід, який охоплює технологічні інновації та аналітичні інструменти прогнозування, є визначальним чинником у забезпеченні сталого розвитку морського транспорту та вдосконаленні математичних моделей оцінки енергоефективності.

Ключові слова: морські перевезення, експлуатація суден, суднові двигуни, морське паливо, судноплавство, енергоефективність, екологічна безпека, морський транспорт, міжнародні конвенції, оптимізація маршрутів, зменшення вуглецевого сліду, інтелектуальні системи управління.

INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND REGULATORY FRAMEWORK FOR OPTIMIZING ENERGY CONSUMPTION IN MARITIME TRANSPORT

M.P. Bulgakov¹, O.M. Melnyk², I.O. Pulyaev³

¹PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department
of Navigation and Maritime Safety,
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-7172-8678

²Sc. D, Professor, Professor at the Department of Navigation and Maritime Safety,
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-9228-8459

³Senior Lecturer, Department of Navigation and Maritime Safety,
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-0592-032X

Summary

Introduction. The energy efficiency of maritime transport is a key research area due to growing environmental regulations and the need to optimize fuel consumption. Although shipping is a vital sector of the global economy, it is also a major source of greenhouse gas emissions, particularly CO₂, NO₂, and SO₂. To mitigate these impacts, organizations like the International Maritime Organization (IMO) have established regulatory measures to enhance fleet efficiency. Key initiatives include the Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships, the Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) for operational improvements, and the Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI) for assessing in-service performance. Alongside regulations, emerging technologies such as digital twins, predictive analytics, AI-driven control systems, and alternative fuels are gaining importance. These innovations optimize ship performance by leveraging real-time data and environmental conditions, reducing fuel consumption and emissions. Additional strategies, including hybrid propulsion systems, fuel-efficient hull coatings, and advanced energy recovery technologies, contribute to improving energy efficiency. However, large-scale adoption faces challenges such as high capital costs, infrastructure limitations, and the need for specialized training. **Purpose.** This study aims to examine innovative technologies, regulatory frameworks, and predictive modeling methods for optimizing energy use in maritime transport. It evaluates the impact of international standards (EEDI, SEEMP, EEOI) and advanced solutions like digital twins, machine learning, alternative

*fuels, and intelligent management systems. The focus is on their role in reducing fuel consumption, emissions, and improving overall sustainability. **Results.** Findings suggest that integrated approaches significantly lower fuel consumption and CO₂ emissions. The study confirms that digital technologies and energy management systems enhance ship efficiency by optimizing routes, speed, and engine loads in real time. Furthermore, the shift to alternative fuels such as liquefied natural gas (LNG), methanol, and hydrogen holds promise for reducing emissions, though it requires substantial investments and technological adaptation. **Conclusions.** The combination of regulations, technological innovations, and predictive modeling is crucial for achieving maritime energy efficiency. These methods optimize fuel use while promoting environmental sustainability. Future research should focus on refining energy efficiency forecasting models and developing adaptation strategies for stricter environmental standards. Further investigation into alternative fuel viability and hybrid propulsion optimization is necessary to facilitate a cost-effective transition to low-carbon shipping.*

Key words: shipping, environmental safety, energy efficiency, maritime transport, international conventions, route optimization, carbon footprint reduction, intelligent control systems.

Вступ. Енергоефективність морського транспорту набуває все більшого значення в контексті посилення екологічного законодавства та зростання вартості палива. Морський транспорт, на який припадає до 90 % вантажних перевезень у світі, залишається одним з основних джерел викидів вуглекислого газу (CO₂) та інших газів (оксидів азоту, NO_x, та сірки, SO_x). Прийняття міжнародних правових стандартів, таких як Конвенція MARPOL, та рівнів енергоефективності (EEDI, SEEMP) покликане мінімізувати негативні екологічні наслідки суднових викидів. Тим не менш виконання наведених нижче вимог вимагає вирішення низки технологічних, економічних та експлуатаційних проблем [1; 3; 5].

Основні виклики включають у себе:

- високе енергоспоживання суден. Відомо, що судна в усьому світі є неефективними, що призводить до неефективного використання палива та викидів парникових газів [4; 6];
- необхідність впровадження інноваційних технологій. Однак, незважаючи на наявність багатьох енергозберігаючих технологій, їх впровадження вимагає великих капітальних інвестицій і часто супроводжується адаптацією портової або суднової інфраструктури;
- використання альтернативних видів палива. Зріджений природний газ (ЗПГ), метанол і водень пропонуються як альтернативні види палива, але їх використання стримується вартістю необхідної модифікації силових установок, а також безпекою під час транспортування і зберігання;
- екологічні ризики та оцінка викидів. Поряд із проблемою викидів CO₂ особливу роль відіграє контроль викидів NO_x та SO_x, які мають значний вплив на екосистеми прибережних регіонів. Сучасний стан справ вимагає розробки нових стратегій моніторингу та контролю викидів в умовах експлуатації [8; 10].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження показують, що енергоефективність на судах набуває все більшого значення через посилення

екологічних стандартів, а також економічні вигоди від скорочення споживання палива. Зокрема, Міжнародна морська організація встановила Індекс енергоефективності проектування (EEDI) та План управління енергоефективністю судна (SEEMP) як основні нормативні вимоги до судноплавства для скорочення викидів CO₂ та підвищення ефективності використання палива [6; 7; 8; 20]. Впровадження низьковуглецевих та замінних видів палива (ЗПП, метанол, водень) є перспективним напрямом, але вимагає адаптації судових енергетичних установок та портової інфраструктури [11; 13; 15].

Окрім нормативно-правової бази, дослідження акцентують увагу на інноваційних технічних рішеннях для оптимізації енергоспоживання суден. Наприклад, впровадження цифрових двійників, предиктивної аналітики та систем машинного навчання може підвищити ефективність управління енергоспоживанням на судах [16; 17]. Дослідження також вказують на те, що оптимізація маршрутів і швидкості може суттєво зменшити споживання палива та викиди [3; 12]. Наприклад, останні дані показують, що такі каталізатори, як SCR, можуть зменшити викиди NO_x, а плазмові пальники – викиди відпрацьованих газів [18]. Водночас оцінка викидів і впливу судноплавства на навколишнє середовище залишається критично важливою сферою досліджень, включаючи аналіз зниження вмісту сірки в судовому паливі та його впливу на морські екосистеми [17; 19–22].

Дослідження обґрунтовують той факт, що поєднання нових технологій, альтернативних видів палива та правил ІМО дозволить дуже суттєво підвищити енергоефективність та пом'якшити вплив судноплавства на навколишнє середовище. Однак усе ще потрібні подальші експериментальні дослідження та впровадження нових методів моніторингу викидів у реальних умовах експлуатації.

Постановка проблеми. У низці джерел висвітлюються міжнародні нормативні документи, спрямовані на підвищення енергоефективності суден, зокрема ІМО та індекси енергоефективності (EEDI, SEEMP). Обговорюються рекомендації та вимоги до морського транспорту щодо скорочення викидів парникових газів і поліпшення екологічних показників судноплавства [24; 28].

Представлені роботи присвячені використанню гібридних двигунів, низьковуглецевих та альтернативних видів палива, таких як скраплений природний газ, метанол і водень, а також технологій уловлювання вуглецю [30; 32].

З огляду на вищезазначене, виникає необхідність розробки комплексних рішень, у тому числі:

- впровадження комбінованих систем управління енергоефективністю, що поєднують механічні, хімічні та цифрові технології;
- оптимізація роботи судових енергетичних установок із застосуванням інноваційних технологій, включаючи використання альтернативних видів палива та наноматеріалів;
- створення підходів і моделей для прогнозування та оцінки ефективності запропонованих рішень, які мінімізують викиди при максимізації експлуатаційних характеристик суден.

Формулювання цілей статті. Основною метою дослідження є розробка та оптимізація комбінованих технологій підвищення енергоефективності суден, які дозволять одночасно зменшити споживання палива та викиди шкідливих

речовин, забезпечивши відповідність сучасним екологічним вимогам; мета роботи включає в себе аналіз існуючих технологій, розробку нових методів моніторингу, контроль викидів у реальних умовах експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Міжнародна конвенція із запобігання забрудненню із суден (MARPOL) є одним з основних регуляторних інструментів, спрямованих на захист морського середовища від забруднення із суден. Разом із Міжнародною конвенцією з охорони людського життя на морі (SOLAS) MARPOL вже є міжнародною основою екологічної та експлуатаційної безпеки морських перевезень. Ці документи були розроблені Міжнародною морською організацією (IMO) і відіграли важливу роль у розвитку нових технологій та підвищенні енергоефективності суден.

На рисунку 1 показано структуру викидів двоокису вуглецю (CO_2) у різних секторах економіки, де видно, що найвагоміший внесок у викиди CO_2 робить сектор виробництва енергії (35 % через споживання викопного палива (вугілля, нафти та природного газу)). Друге місце посідає промисловість (23 %), викиди якої пов'язані з виробничим процесом та використанням тепла.

На транспортний сектор (включно з морським транспортом) припадає 15 % цього показника. У цій категорії викиди викопного палива є результатом спалювання палива у двигунах автомобілів, літаків і суден. Морський транспорт є одним із найбільш енергоємних видів транспорту, тому особливо важливо розробляти нові технології для підвищення енергоефективності суден.

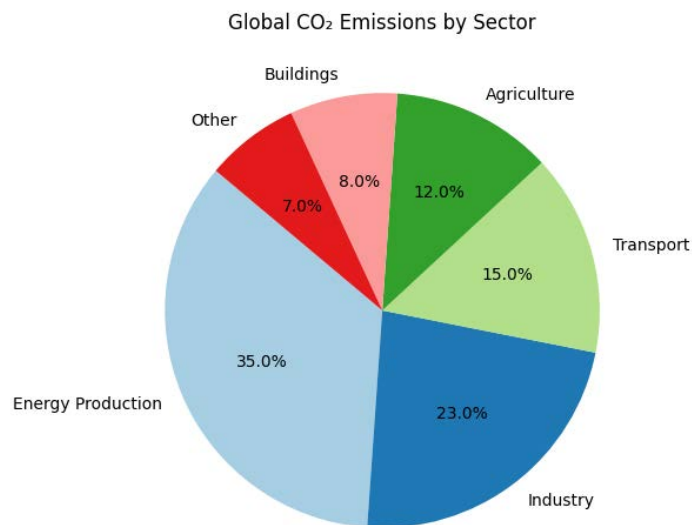


Рис. 1. Глобальні викиди CO_2 за секторами (складено авторами за даними статистичних джерел [2–8])

Як показано вище, решта викидів припадає на сільське господарство (12 %), будівлі (8 %) та інші джерела (7 %). Ця гістограма підкреслює, що, незважаючи на відносно менший внесок транспорту у глобальні викиди порівняно з енергетикою та промисловістю, він залишається ключовою сферою для впровадження заходів зі зменшення вуглецевого сліду.

Основні інструменти управління енергозбереженням представлені на рисунку 2, який складено авторами на основі агрегованих даних із джерел [2–8], що охоплюють усереднені показники глобального розподілу викидів за останнє десятиріччя.

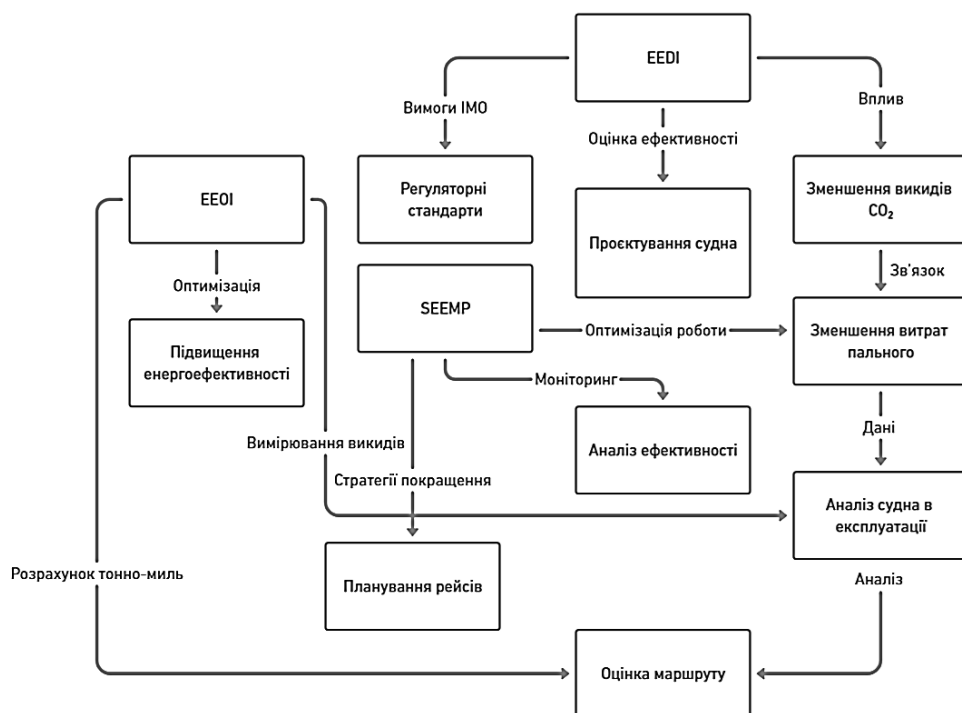


Рис. 2. Основні інструменти управління енергоефективністю
(авторська розробка)

Індекс енергоефективності проектування (EEDI) та План управління енергоефективністю судна (SEEMP) є одними з обов'язкових положень щодо енергоефективності, встановлених Комітетом із захисту морського середовища ІМО (МЕРС). EEDI встановлює мінімальний рівень енергоефективності для нових суден, стимулюючи розробку інноваційних конструкцій і технологій для зниження споживання палива і викидів CO₂. SEEMP – це інструмент енергоменеджменту для суден, що перебувають в експлуатації, який передбачає створення детальних планів підвищення енергоефективності та моніторинг прогресу.

Індекс EEDI призначений для вимірювання проектної енергоефективності нових суден. Він розраховується як відношення викидів CO₂ (грам) до індексу транспортної роботи (тонно-миля). EEDI можна розрахувати таким чином:

$$EEDI = \frac{DW \cdot V_{ref} \cdot f_w \cdot f_c}{\sum_i (CF_i \cdot SFC_i \cdot P_i \cdot f_{w,i} \cdot f_i \cdot f_p)}, \quad (1)$$

де CF_i – коефіцієнт перерахунку вуглецю для i -го палива; SFC_i – питома витрата палива i -го двигуна, (г/кВт-год); P_i – потужність i -ї силової установки (кВт);

DW – дедвейт судна (тон); V_{ref} – швидкість судна на випробуваннях (вузлів); f_w – коригувальний коефіцієнт погодних умов; f_c – коефіцієнт завантаженості судна.

$$\sum_i (CF_i \cdot SFC_i \cdot P_i \cdot f_{w,i} \cdot f_i \cdot f_p), \quad (2)$$

$f_{w,i}$ – поправочний коефіцієнт на експлуатаційні умови судна (хвилювання, вітер), f_i – коефіцієнт впливу інноваційних технологій (наприклад, поліпшена аеро- і гідродинаміка), f_p – поправочний коефіцієнт на ефективність пропульсивної установки.

План управління енергоефективністю судна (SEEMP) – це план, що містить заходи і практики, спрямовані на скорочення споживання палива і викидів CO_2 . SEEMP охоплює такі практики:

- оптимізація маршруту: базується на погодних даних і оптимізує маршрути, щоб мінімізувати опір води;
- зниження швидкості: експерименти показують, що 30 % скорочення споживання пального досягається за умови зниження швидкості руху на 10–20 % від початкової швидкості;
- покращення стану корпусу: очищення корпусу та нанесення сучасних покриттів дозволяє ефективно зменшити опір тертя.

ЕЕОІ є ще одним ключовим структурним елементом системи управління енергоефективністю на судах. Цей показник був розроблений ІМО з метою оцінки ефективності суден у практичних умовах експлуатації. На відміну від EEDI, який фокусується на проєктних характеристиках, ЕЕОІ дозволяє судновласникам і операторам оцінювати споживання енергії на основі фактичних рейсових даних і використовувати їх для коригування експлуатаційних практик. ЕЕОІ розраховується за такою формулою:

$$EEOI = \frac{\sum (FC_i \cdot CF_i)}{\sum (m_i \cdot D_i)}, \quad (3)$$

де FC_i – споживання i -го виду палива (тонни); CF_i – коефіцієнт перерахунку вуглецю для i -го виду палива; m_i – маса вантажу (тони); D_i – пройдена відстань (морські милі).

Графік на рисунку 3 ілюструє тенденцію скорочення викидів двоокису вуглецю (CO_2) на морському транспорті з моменту запровадження Індексу енергоефективності при проєктуванні суден (EEDI). Лінія, позначена як «Базові викиди (без EEDI)», показує рівень викидів без заходів з енергоефективності, де спостерігається лише незначне скорочення завдяки поступовому вдосконаленню систем двигуна та експлуатаційних практик.

Дані, представлені на рис. 3, отримані на основі власних аналітичних розрахунків авторів із застосуванням даних для узагальнених характеристик трьох типів суден: контейнеровозів, балкерів та пасажирських суден. Значення є середніми для типових представників кожної категорії.

Лінії тренду вказують на значне скорочення викидів завдяки заходам EEDI, причому базові викиди знижуються повільніше, а викиди, оптимізовані за допомогою EEDI, знижуються більш різко, майже на 40 % від базового рівня 2013 року до 2050 року. Тому включення прогнозованих тенденцій дає більш чітке уявлення про довгостроковий вплив, підкреслюючи необхідність подальшого впровадження енергоефективних технологій на морському транспорті.

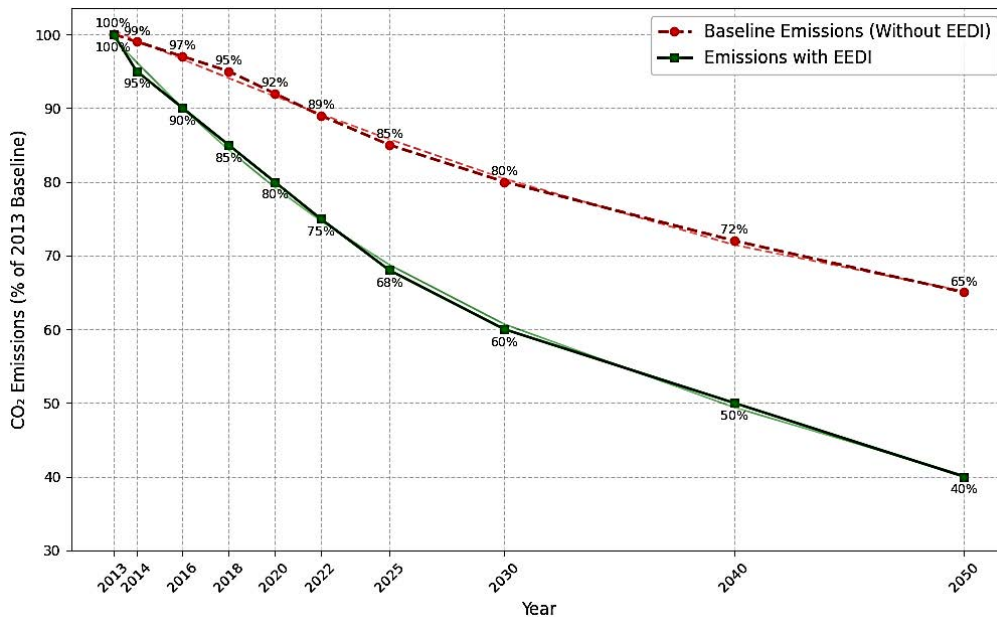


Рис. 3. Скорочення викидів CO₂ з часом завдяки впровадженню EEDI

Для більш точної оцінки енергоефективності морського судна доцільно буде застосувати динамічну систему рівнянь, яка описує взаємозв'язок між основними експлуатаційними параметрами: витратою палива, викидами CO₂ та пройденою відстанню. Нижче наведено ключові математичні залежності, що можуть бути інтегровані в інтелектуальну модель моніторингу паливної ефективності в режимі реального часу.

Рівняння витрати палива залежно від швидкості та погодних умов

$$\frac{dF(t)}{dt} = -k_1 \cdot V(t) + k_2 \cdot W(t) + k_3 \cdot T_f(t), \quad (4)$$

де $F(t)$ – витрата палива в момент часу; $V(t)$ – швидкість судна; $W(t)$ – вплив вітру; $T_f(t)$ – паливний коефіцієнт. k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти, що визначені експериментально та стосуються певних типів суден: контейнеровозів, балкерів та пасажирських суден. Залежність є спрощеною та апроксимує витрату палива в межах обмеженого діапазону швидкостей. У більш загальному випадку опір пропорційний квадрату швидкості, а потужність – її кубу.

Залежність є спрощеною та апроксимує витрату палива в межах обмеженого діапазону швидкостей (типово $\pm 10\text{--}15\%$ від номінальної), де лінійна залежність може бути прийнятною для оперативної оцінки. У більш загальному випадку опір пропорційний квадрату швидкості, а потужність – кубу.

Рівняння зміни викидів CO₂:

$$E_{CO_2}(t) = F(t) \cdot K_h(t) \cdot \epsilon, \quad (5)$$

де: $E_{CO_2}(t)$ – викиди CO₂ у момент часу t , $F(t)$ – базова витрата палива (наприклад, для чистого корпусу), $K_h(t)$ – коефіцієнт стану корпусу (обростання, корозія

тощо), ϵ – емісійний коефіцієнт (для дизельного палива ≈ 3.114 кг CO_2 /кг палива). Врахування стану корпусу обґрунтоване тим, що обростання або пошкодження корпусу підвищують гідродинамічний опір, що, своєю чергою, збільшує витрати палива, яке є єдиним джерелом вуглецю для CO_2 .

Тоді показник енергоефективності буде мати вигляд:

$$E(t) = \frac{D(t)}{F(t) \cdot CF}, \quad (6)$$

де $E(t)$ – показник енергоефективності; $D(t)$ – пройдена відстань; CF – коефіцієнт перерахунку вуглецю.

Система рівнянь для прогнозування енергоефективності:

$$\frac{dF(t)}{dt} = -k_1 \cdot V(t) + k_2 \cdot W(t) + k_3 \cdot T_f(t) \frac{dC_{\text{CO}_2}(t)}{dt} = \alpha \cdot F(t) + \beta \cdot S(t) EE(t) = \frac{D(t)}{F(t) \cdot CF}. \quad (7)$$

Наведена система дозволяє розрахувати як поточну, так і прогнозовану ефективність використання суднового палива, а також дає змогу оцінити екологічні наслідки. Інтеграція цих рівнянь у цифровий двійник або платформу моніторингу судна також здатна забезпечити прийняття рішень у реальному часі та формувати оптимальні маршрути переходу з урахуванням погодних умов, технічного стану судна та стратегій енергозбереження.

Результати дослідження. Оскільки судноплавна галузь прагне зменшити свій вуглецевий слід і відповідати міжнародним стандартам, таким як MARPOL та правила ІМО, виникає потреба в нових підходах, які забезпечать високу енергоефективність та екологічну стійкість. Існує декілька шляхів для досягнення цих цілей. Далі запропоновані методи, спрямовані на покращення експлуатаційних характеристик судна, зменшення споживання палива та мінімізацію викидів парникових газів.

З метою підвищення енергоефективності морських суден, з огляду на сучасні вимоги щодо зменшення викидів та підвищення економічної доцільності експлуатації суден, активно розробляються та впроваджуються інноваційні підходи. Основні напрями розвитку таких технологій представлені у таблиці 1.

Таблиця 1

Основні напрями розвитку (методи) підвищення енергоефективності суден

Напрямок розвитку / Метод	Ключові елементи / Особливості
Використання цифрових технологій	Створення цифрових двійників суден для моніторингу в реальному часі та корекції параметрів їх експлуатації
Застосування методів машинного навчання	Алгоритми машинного навчання для виявлення прихованих залежностей та оптимізації управління паливом
Перехід на альтернативні види палива	Моделювання роботи суден на ЗПГ, водні, метанолі з вибором оптимального варіанту для умов експлуатації
Комбіновані стратегії управління енергоефективністю	Оптимізація маршруту, зниження швидкості, вдосконалення корпусу і конструкції гвинтів для зменшення споживання палива
Розробка математичних моделей для прогнозування енергоефективності	Врахування погодних умов, видів палива та зміни швидкості судна для мінімізації витрат і викидів CO_2

Використання таких підходів дозволяє не лише скорочувати витрати палива й експлуатаційні витрати, а й активно відповідати на сучасні екологічні виклики. А застосування моделей, аналітичних алгоритмів і методів адаптивного управління загалом створює основу для переходу морського транспорту на новий рівень ефективності й сталого розвитку.

На рисунку 4 показано залежність витрати палива від швидкості судна за різних вітрових умов. Сині лінії відповідають умовам слабого вітру (Low Wind, 0.5x), а червоні лінії – умовам сильного вітру (High Wind, 1.5x). Заштрихована область показує діапазон зміни витрати палива залежно від вітрових умов. На низьких швидкостях вплив вітру на витрату палива мінімальний і витрата зростає лінійно зі збільшенням швидкості. Під час сильного вітру збільшення витрати палива стає більш вираженим на високих швидкостях. Заштрихована область показує діапазон, в якому може змінюватися витрата палива у разі зміни вітрових умов. Це підкреслює важливість урахування погодних факторів у плануванні рейсу і виборі оптимальної швидкості.

У разі переходу на середні швидкості вплив вітру поступово зростає, що зумовлює збільшення розкиду значень витрати пального. Це пояснюється тим, що опір води і повітря починає відігравати значну роль у формуванні загального енергетичного балансу судна. В умовах сильного вітру найоптимальнішою стратегією може бути вибір компромісної швидкості, що дозволить мінімізувати витрати палива без значних затримок у графіку перевезень.

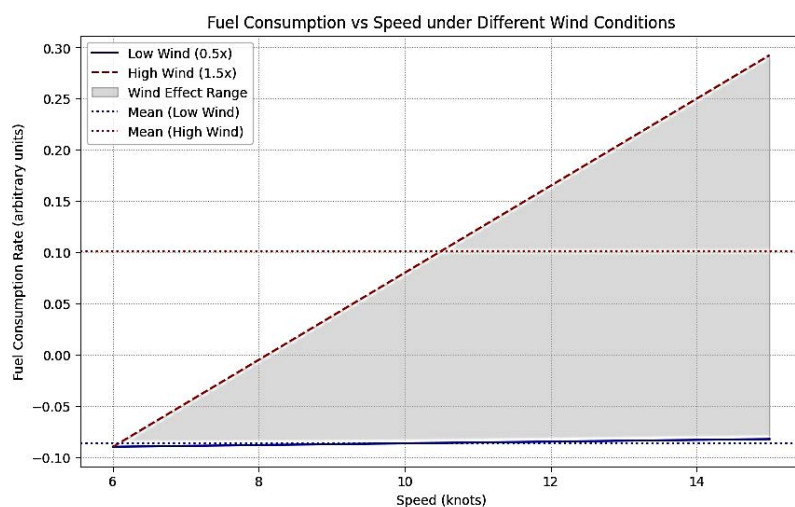


Рис. 4. Вплив швидкості та вітру на витрату палива

На рисунку 5 показано еволюцію викидів CO₂ залежно від стану корпусу з плином часу. Помаранчева лінія представляє прогнозовані викиди CO₂, а заштрихована область показує можливі коливання викидів у межах $\pm 10\%$ від середнього значення. Заштрихована область показує, наскільки викиди можуть коливатися за різних умов експлуатації судна, таких як забруднення корпусу та погодні умови. Стан корпусу прямо впливає на опір, що призводить до зміни витрати палива і, відповідно, рівня

CO₂. Графік моделює ці змінні з урахуванням цього опосередкованого впливу. Середня лінія викидів (пунктирна лінія) забезпечує базовий рівень, з яким можна порівняти поточні значення для оцінки ефективності експлуатаційних заходів.

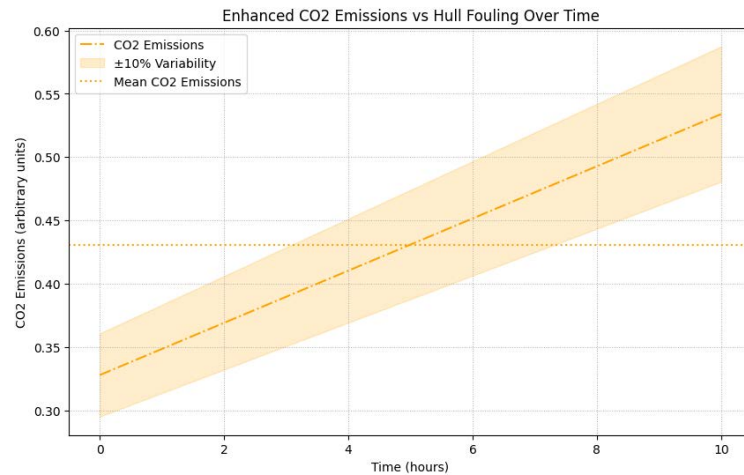


Рис. 5. Динаміка викидів CO₂ залежно від стану корпусу судна

Графік рисунка 6 показує залежність енергоефективності від пройденної відстані з плином часу. Зелена пунктирна лінія відображає зміну енергоефективності, а заштрихована область показує діапазон зміни в межах $\pm 5\%$. Енергоефективність зменшується з часом через збільшення опору корпусу, погіршення погодних умов і збільшення споживання палива. Заштрихована область показує допустимі відхилення значень енергоефективності при зміні зовнішніх умов, таких як швидкість вітру і хвилювання. Пунктирна лінія середнього значення слугує базовою метрикою для оцінки ефективності судна на різних ділянках маршруту.

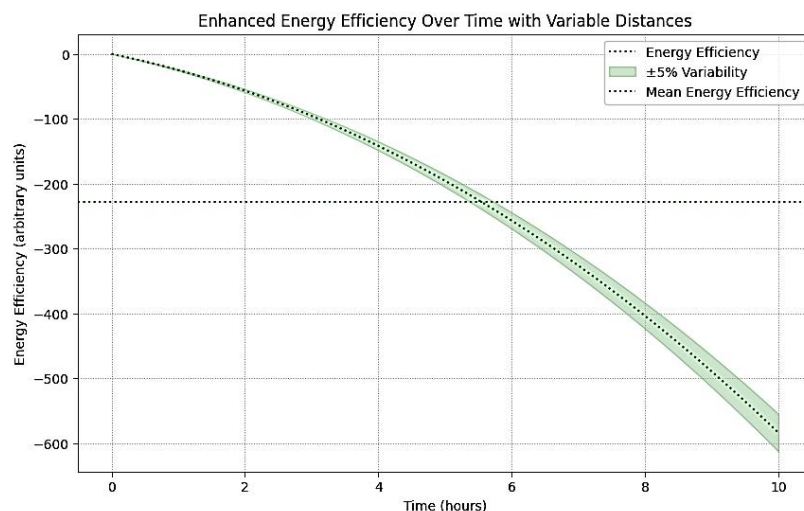


Рис. 6. Залежність енергоефективності від пройденної відстані

Розглянемо більш детально розробку математичних моделей для прогнозування енергоефективності. Основною метою розробки математичних моделей є прогнозування показників енергоефективності судна за різних умов експлуатації. Такі моделі допоможуть власникам та операторам суден приймати більш обґрунтовані рішення щодо маршруту, швидкості та типу палива, що використовується.

Прогнозування енергоефективності може базуватися на диференціальних рівняннях, що описують зміну споживання палива і викидів залежно від часу й умов експлуатації. У таблиці 2 наведено ключові елементи моделей.

Таблиця 2

Ключові елементи моделей

Ключовий елемент	Опис
Зміна погодних умов	Модель враховує швидкість вітру, висоту хвиль і температуру води, які впливають на витрату палива та викиди CO ₂ . Прогнози на основі цих даних дозволяють коригувати маршрут для мінімізації зовнішніх впливів.
Використання різних видів палива	Кожний тип палива має свій коефіцієнт перетворення вуглецю. Моделі враховують ці відмінності для точного прогнозування викидів та оптимізації споживання палива у разі використання альтернативних видів палива.
Зміна швидкості судна	Оптимальна швидкість залежить від стану моря та погодних умов. Модель враховує зміни швидкості на різних ділянках маршруту, щоб зменшити загальне споживання палива.

Новизна цього підходу полягає в комплексному моделюванні енергоефективності. Запропонована система рівнянь дозволяє врахувати декілька факторів, що впливають на споживання палива та викиди: швидкість судна, погодні умови, тип палива, що використовується, та стан корпусу.

Прогнозування викидів у режимі реального часу та інших забруднюючих речовин дозволяє операторам суден заздалегідь коригувати маршрут і швидкість, щоб мінімізувати вплив на навколишнє середовище.

Висновки. Адаптивна система управління на основі даних, зібраних із датчиків на судні, дозволяє використовувати запропоновані моделі для створення адаптивної системи управління, яка буде автоматично регулювати параметри судна залежно від зовнішніх умов.

Ідеальна картина майбутнього енергозбереження в судноплаванні – це картина, в якій кількість споживання палива і парникових газів легко нормалізується. Інтеграція прогнозування та технології цифрових двійників є однією з ключових проблем, які становлять великий інтерес. Судноплавання цифрових двійників дозволить у режимі реального часу моделювати кількість споживаної енергії, прогнозувати майбутні зміни умов експлуатації та апіорі оновлювати точки, відстань, швидкість і маршрут для мінімізації споживання палива. Значний внесок зроблять системи штучного інтелекту, що використовують технології машинного навчання та штучного інтелекту. Ці системи будуть використовуватися як для поглинання знань, зібраних під час попередніх місій, так і для оперативних даних у поточному розташуванні, в автоматичному впорскуванні суднових систем.

Окремої уваги заслуговує розробка нових покриттів для корпусів суден з покращеними гідродинамічними властивостями. Самоочищувальні та протизношувальні

покриття нині також здатні суттєво зменшити втрати на тертя, що дасть поштовх до економії пального та підвищення продуктивності двигунів наступного покоління. Привабливим напрямом є розвиток гібридів, в яких комбінуються двигун внутрішнього згоряння та електричні елементи, який є особливо успішним у країнах із суворим законодавством з питань охорони навколишнього середовища. Існують також інші плани щодо розвитку технологій чистої енергії (наприклад, сонячні панелі, вітрогенератори) для зменшення залежності від викопних видів палива.

Оптимізація маршрутів суден є одним з оперативних інструментів, що використовуються для досягнення енергоефективності на практиці. Використання супутникових даних про погоду, течії та стан водної поверхні відіграватиме певну роль у визначенні найбільш енергоефективного маршруту. Однак одночасно з розробкою все більш досконалих систем теплообміну з'явиться можливість використовувати енергію вихлопних газів двигунів для задоволення потреб судна, що ще більше скоротить споживання палива. Однією з тем для обговорення є перехід на паливо третього покоління (наприклад, водень, аміак або біогаз) і пов'язані з цим величезні викиди CO₂ та інших забруднюючих речовин.

Показники енергоефективності суден у режимі реального часу зрештою мають бути узгоджені на міжнародному рівні. Усе це не тільки підвищить вагомість судноплавних компаній, але й спонукатиме їх активно об'єднуватися, створюючи інноваційні рішення. Виконання всіх вищезазначених кроків призведе до значного скорочення викидів вуглекислого газу в морській індустрії та підвищення конкурентоспроможності судновласників за рахунок зниження собівартості судноплавних операцій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Volyanskaya, Y., Volyanskiy, S., Onishchenko, O., & Nykul, S. (2018). Analysis of possibilities for improving energy indicators of induction electric motors for propulsion complexes of autonomous floating vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(8), 25–32.
2. International Maritime Organization (2023, July). 2023 IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/IMO-Strategy-on-reduction-of-GHG-emissions-from-ships.aspx>
3. Hüffmeier, J., & Johanson, M. (2021). State-of-the-art methods to improve energy efficiency of ships. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(447). <https://doi.org/10.3390/jmse9040447>
4. Rajeev, J. (2018). Ship energy efficiency: Here is all you need to know. Retrieved from: <https://www.myseatime.com/blog/detail/ship-energy-efficiency>
5. Maritime Cyprus. (2018). Energy efficiency in shipping: Why it matters. Retrieved from: <https://maritimecyprus.com/2018/04/03/energy-efficiency-in-shipping-why-it-matters>
6. International Maritime Organization (2016). Train the trainer (TTT) course on energy efficient ship operation: Module 2 — Ship energy efficiency, regulations and related guidelines. London.

7. International Maritime Organization (2009). Guidelines for voluntary use of the ship EEOI. MEPC.1/Circ.684.
8. International Maritime Organization (2013). Guidance on treatment of innovative energy efficiency technologies for calculation and verification of the attained EEDI for ships in adverse conditions. MEPC.1/Circ.815.
9. Yuan, Y., Li, Z., Malekian, R., & Yan, X. (2017). Analysis of the operational ship energy efficiency considering navigation environmental impacts. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 16(3), 150–159.
10. GloMEEP. (n.d.). Energy efficiency technologies information portal. Retrieved from: <https://glomeep.imo.org/resources/energy-efficiency-technologies-information-portal>
11. Shivam, S. (2019). Ship energy efficiency. Retrieved from: <http://themarineexpress.com/ship-energy-efficiency>
12. Hannes, J., & Styhre, L. (2015). Increased energy efficiency in short sea shipping through decreased time in port. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 71, 167–178.
13. Comer, B., & Osipova, L. (2021). Accounting for well-to-wake carbon dioxide equivalent emissions in maritime transportation climate policies. Retrieved from: <https://theicct.org/publication/accounting-for-well-to-wake-carbon-dioxide-equivalent-emissions-in-maritime-transportation-climate-policies>
14. Rayhan, F. (2021). Ship pollution and emission: A recent fact ship emissions & pollution: A real threat to global warming.
15. Yan, S. (2012). Study on ship pollution prevention measures. In *7th International Conference on System of Systems Engineering (SoSE)* (pp. 283–285).
16. Melnyk, O. M., Onishchenko, O. A., Shibaev, O. G., Kuznichenko, S. O., Bulgakov, M. P., Shcherbina, O. V., Yaremenko, N. O., & Voloshyn, D. A. (2024). Development of strategies for reducing nitrous oxide emissions from marine diesel engines. *Journal of Chemistry and Technologies*, 32(2), 465–479. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i2.297410>
17. Melnyk, O. M., Onishchenko, O. A., Shyshkin, O. V., Volkov, O. M., Volyanskyy, S. M., Maulevych, V. O., & Kreitser, K. O. (2024). Enhancing shipboard technical facility performance through the utilization of low-sulfur marine fuel grades. *Journal of Chemistry and Technologies*, 32(1), 233–245. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i1.297916>
18. Rodríguez García, M. I., Rodrigues, M., González-Enrique, J., Ruiz Aguilar, J., & Turias, I. (2023). Forecasting air pollutants using classification models: A case study in the Bay of Algeciras (Spain). *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1–25. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02512-2>
19. Thomson, H., Corbett, J. J., & Winebrake, J. J. (2015). Natural gas as a marine fuel. *Energy Policy*, 87, 153–167.
20. Jang, J., Ahn, S. Y., Na, S., Koo, J., Roh, H., & Choi, G. (2022). Effect of a plasma burner on NO_x reduction and catalyst regeneration in a marine SCR system. *Energies*, 15(4306). <https://doi.org/10.3390/en15124306>

21. Micco Di, S., Silvestri, L., Antonio, F., Jannelli, E., & Minutillo, M. (2022). Economic-comparative study for carbon neutrality during ships docking and in port operations: A path towards maritime sector decarbonisation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2385, 012049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2385/1/012049>
22. Ding, J., Mijling, R., Jalkanen, J. P., Johansson, L., & Levelt, P. (2018). Maritime NO_x emissions over Chinese seas derived from satellite observations. *Geophysical Research Letters*, 45. <https://doi.org/10.1002/2017gl076788>
23. Fu, Q., Shen, Y., & Zhang, J. (2012). On the ship pollutant emission inventory in Shanghai port. *Journal of Safety and Environment*, 12, 57–64.
24. Tian, Y., Ren, L., Wang, H., Li, T., Yuan, Y., & Zhang, Y. (2022). Impact of AIS data thinning on ship air pollutant emissions inventories. *Atmosphere*, 13(1135). <https://doi.org/10.3390/atmos13101135>
25. Indian Register of Shipping. (2015). Implementing energy efficiency design index. Mumbai. Retrieved from: http://www.irclass.org/files/marine_publications/EEDI_2015.pdf
26. Pronin, S., Belousov, E., Marchenko, A., Gritsuk, I., & Bulgakov, N. (2020). Research of the gas fuel supply process on the compression stroke in ship's low-speed gas-diesel engines. *SAE Technical Paper*, 2020-01-2107. <https://doi.org/10.4271/2020-01-2107>
27. International Maritime Organization (2015). Third IMO GHG study 2014: Executive summary and report.
28. Bilgili, L. (2021). Life cycle comparison of marine fuels for IMO 2020 sulphur cap. *Science of the Total Environment*, 774, 145719.
29. Theotokatos, G., Stoumpos, S., Bolbot, V., & Boulougouris, E. (2020). Simulation-based investigation of a marine dual-fuel engine. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 19(Sup1), 5–16.
30. Ammar, N. (2023). Methanol as a marine fuel for greener shipping: Case study tanker vessel. *Journal of Ship Production and Design*, 39, 1–11. <https://doi.org/10.5957/JSPD.03220012>
31. Petetin, H., Guevara, M., Compernelle, S., Bowdalo, D., Bretonnière, P. A., Enciso, S., Jorba, O., Lopez, F., Soret, A., & Pérez García-Pando, C. (2023). Potential of TROPOMI for understanding spatio-temporal variations in surface NO₂ and their dependencies upon land use over the Iberian Peninsula. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 3905–3935. <https://doi.org/10.5194/acp-23-3905-2023>
32. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., Shumylo, O., Voloshyn, A., Ocheretna, V., & Fedorenko, O. (2024). Implementation research of alternative fuels and technologies in maritime transport. *Studies in Systems, Decision and Control*, 510, 13–21. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_2