

МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.6:629

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2025.3-26.02>

АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА РИЗИКІВ ТА МОЖЛИВОСТЕЙ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В МОРСЬКИХ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ: SWOT-АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ПАЛИВНИХ ПРИСАДОК

А.М. Ібрагім¹, К.М. Клевцов²

¹ аспірант «Кафедри транспортних технологій і судноремонту»,
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0009-0007-6007-5708

² д-р техн. наук, професор «Кафедри транспортних технологій і судноремонту»,
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-8486-1104

Анотація

Вступ. У статті розглядається актуальна проблема оптимізації енергоефективності в морських мультимодальних перевезеннях у контексті сучасних екологічних та економічних викликів. На тлі посилення вимог ІМО щодо скорочення викидів і зростання вартості палива судновласники потребують не лише нових технологій, а й надійних інструментів для оцінки ризиків їх запровадження. Стаття фокусується на методологічному підході до прийняття обґрунтованих управлінських рішень. **Мета.** Метою статті є обґрунтування застосування SWOT-аналізу як методологічного інструменту для аналітичної оцінки ризиків і можливостей під час запровадження енергозберігаючих технологій. Як практичний приклад для апробації цього методу розглянуто доцільність використання паливних присадок – технологічно доступного заходу, ефективність якого, однак, залежить від багатьох факторів і потребує комплексного аналізу перед імплементацією. **Результати.** У статті акцентовано увагу на практичному інструменті прийняття рішень – SWOT-аналізі. Продемонстровано, що цей метод дає змогу комплексно оцінити сильні та слабкі сторони застосування паливних присадок (зниження витрат палива проти їх вартості), а також зовнішні можливості та загрози (посилення екологічних норм проти появи неякісної продукції). Для підвищення об'єктивності проведено кількісну інтерпретацію аналізу, яка показала загальний позитивний рейтинг (0,158), що свідчить про доцільність запровадження технології в розглянутих умовах. **Висновки.** Запропонований підхід доповнює існуючі методи оцінки енергоефективності, надаючи судновласникам структурований інструмент для прийняття обґрунтованих рішень в умовах багатофакторної невизначеності.

Підкреслено, що SWOT-аналіз є ефективним засобом для оцінки операційних, економічних та екологічних ризиків, що повністю відповідає сучасним вимогам до управління в морському транспорті та може бути застосований для аналізу інших інноваційних технологій.

Ключові слова: енергоефективність, енергетична установка судна, заощадження пального, комплексний аналіз, мультимодальні перевезення.

OPTIMIZATION OF ENERGY EFFICIENCY AND RISK ASSESSMENT FOR ITS IMPLEMENTATION IN MARINE MULTIMODAL ECO-ORIENTED TRANSPORTATION

A.M. Ibrahim¹, K.M. Klevtsov²

¹ Ph.D., Department of transport technologies and ship repair,
Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0007-6007-5708

² D.Sc., Professor, Department of transport technologies and ship repair,
Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-8486-1104

Summary

Introduction. The article addresses the urgent issue of energy efficiency optimization in maritime multimodal transportation amidst current environmental and economic challenges. Facing stricter IMO emission requirements and rising fuel costs, shipowners need not only new technologies but also reliable tools to assess the risks of their implementation. The article focuses on a methodological approach to making well-founded managerial decisions. **Aims.** The article aims to substantiate the use of SWOT analysis as a methodological tool for the analytical assessment of risks and opportunities when implementing energy-saving technologies. The feasibility of using fuel additives is examined as a case study to test this method – a technologically accessible measure, the effectiveness of which, however, depends on many factors and requires a comprehensive pre-implementation analysis. **Results.** The article focuses on a practical decision-making tool – SWOT analysis. It is demonstrated that this method allows for a comprehensive assessment of the strengths and weaknesses of using fuel additives (e.g., fuel savings vs. additive costs), as well as external opportunities and threats (stricter environmental regulations vs. the emergence of low-quality products). To enhance objectivity, a quantitative interpretation of the analysis was performed, yielding an overall positive rating of 0.158, which indicates the viability of implementing the technology under the considered conditions. **Conclusions.** The proposed approach complements existing methods for assessing energy efficiency by providing shipowners with a structured tool for making informed decisions under conditions of multifactorial uncertainty. It has been proven that SWOT analysis is an effective means for evaluating operational, economic, and environmental risks, fully aligning with modern management requirements in maritime transport and applicable to the analysis of other innovative technologies.

Key words: energy efficiency; ship power plant; fuel saving; comprehensive analysis; multimodal transportation.

Вступ. Глобальні виклики сучасності, а саме зміна клімату, вичерпання природних ресурсів і коливання цін на енергоносії, усе більше спонукають світову спільноту до пошуку ефективних рішень у сфері енергозбереження та зменшення екологічного сліду. Масштаби сучасної економічної діяльності й обсяги міжнародних перевезень диктують необхідність постійного вдосконалення в напрямі підвищення енергоефективності та інтеграції еколого-орієнтованих підходів. Це не лише відповідає вимогам міжнародних регуляторів, а й відкриває нові перспективи для оптимізації логістичних ланцюгів та зниження операційних витрат. Перехід до більш сталого розвитку є комплексною задачею, що потребує системного аналізу та впровадження інноваційних технологій, які б забезпечували баланс між економічною доцільністю й екологічною відповідальністю.

Постановка проблеми. У сучасних умовах зростання вартості паливно-енергетичних ресурсів та необхідності зниження викидів парникових газів особливої актуальності набуває питання оптимізації енергоефективності морських вантажних перевезень. Головну роль регулятора тут відіграє Міжнародна морська організація (ІМО). Основні її вимоги регулюються Додатком VI Міжнародної конвенції щодо запобігання забрудненню з суден (MARPOL). Він постановляє підвищити свою енергоефективність у короткостроковій перспективі та, таким чином, зменшити свої викиди парникових газів. Адже, за даними ІМО, на морське судноплавство припадає близько 3 % цих викидів [1]. За прогнозами науковців, цей показник до 2050 року зросте до 17 %, якщо його не контролювати. Оскільки морський транспорт обслуговує 80–90 % світової торгівлі, вивчення питання використання енергії в судноплаванні є актуальним і лежить в основі пом'якшення змін клімату [2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. За результатами проведеного аналізу наукової літератури, присвяченої вивченню енергозбереження та зменшення викидів парникових газів (ПГ) на морському транспорті, розглянемо систематизований перелік заходів, котрі пропонуються дослідниками. Також проаналізуємо переваги та недоліки кожного з них.

Зниження швидкості суден, або так зване повільне плавання (Slow steaming), є одним із найбільш ефективних операційних підходів для скорочення споживання палива, а отже, викидів ПГ. Згідно з дослідженнями, зменшення швидкості на 1 вузол може знизити витрати пального до 25 %. Більшість суден при цьому працює з навантаженням двигуна в межах 50–65 %. Зниження швидкості дає змогу скоротити ефективну потужність на 52 %, що може зменшити щорічні викиди CO₂ на 22 кілотонни. Зменшення швидкості на 40 % забезпечує зниження викидів майже на 80 %. Оптимізація маршрутів та швидкості на основі моделей штучного інтелекту дає змогу визначити економічно вигідний режим руху, враховуючи тип і розмір судна [3].

Економічний ефект від впровадження повільного ходу зумовлений нелінійною залежністю опору судна від його швидкості. Зменшення швидкості призводить до пропорційно більшого зниження гідродинамічного опору корпусу, що прямо впливає на витрату енергії силової установки.

Однак поряд із перевагами слід враховувати й певні недоліки цього методу. Уповільнення ходу судна впливає на окупність інвестицій, оскільки зменшується

кількість рейсів, а збільшення кількості суден може нівелювати екологічний ефект. Також зменшення швидкості може негативно впливати на морехідні якості судна, зокрема на його остійність на курсі, що потрібно враховувати під час планування логістичних операцій [4; 5].

Модернізації енергетичної та силової установки судна. Аналіз досліджень говорить про значне скорочення викидів. Однак середнє очікуване скорочення для заходів, пов'язаних із силовою та руховою системами, є відносно низьким. Це відображає виклики та граничні умови, пов'язані з упровадженням цих заходів. Наприклад, справді інтегрована гібридна трансмісія значно відрізняється від традиційної установки. Виконання всіх умов, необхідних для оптимального впровадження та значного скорочення викидів, є складним завданням для такої ранньої стадії технології. Для деяких із більш звичайних заходів, як-от пристрої для підвищення ефективності, за останні десятиліття вже відбулися значні покращення, і, ймовірно, подальші вдосконалення залишаються незначними, оскільки наближаються фізичні обмеження [6].

Модернізація конструкції судна дає обмежений, але надійний ефект, який досягається завдяки підвищенню енергоефективності судна. Цей метод полягає в локальній модернізації корпусу і пропульсії. Вдалими прикладами можуть слугувати інноваційні цибулинні носові елементи або невеликі придатки корпусу (наприклад, статори попереднього завихрення, скеги, підводні кормові крила, система воріт руля). Часто такі модернізації є недорогими, з помірним потенціалом декарбонізації приблизно до 10 % скорочення викидів. Однак їх ефективність декарбонізації на одиницю інвестицій дуже висока.

Альтернативні джерела енергії. Найперспективнішими технологіями є ротори Флеттнера, вітрила-крила та буксирні повітряні змії. Вітрові турбіни вважаються неоптимальними через їх обмежену ефективність декарбонізації в розмірі 1–2 %. Ефективність роторів Флеттнера може досягати 20 %. Однак громадськість іноді сприймає ротори як неестетичні. Це обмежує їх застосування на деяких кораблях, наприклад моторних яхтах і круїзних лайнерах. У будь-якому випадку модернізація роторами Флеттнера і вітрилами-крилами потребує значного простору на палубі. Тому обидві технології підходять для балкерів, танкерів і генеральних вантажних суден [7].

Альтернативні види палива. Біопаливо, вироблене з відновлюваних органічних джерел, може знизити викиди CO₂ (до 20 %) і твердих частинок (до 50 % для сажі) без значної модифікації наявної інфраструктури. Однак його стабільність і логістика постачання є проблемними, а економічна ефективність у середньо- та довгостроковій перспективі є невизначеною порівняно з воднем та аміаком. Біодизель демонструє енергетичну щільність, порівнянну з дизельним паливом [8].

Водень є паливом з нульовими викидами у виробництві з відновлюваних джерел, проте характеризується низькою об'ємною енергетичною щільністю. Це зумовлює значні вимоги до об'єму зберігання: вчетверо більше, ніж MGO, вдвічі більше, ніж скраплений природний газ. Кріогенне зберігання та безпека є ключовими проблемами.

Аміак може використовуватися в існуючих двигунах та паливних елементах і має розвинену інфраструктуру транспортування та зберігання. Основними недоліками є його токсичність і негативний вплив на екосистеми.

Електроенергія, накопичена в акумуляторах, забезпечує нульові викиди та високу енергоефективність. Однак акумулятори мають значно нижчу масову й об'ємну енергетичну щільність порівняно з традиційними паливами, високі капітальні витрати та енергоємне виробництво.

Скrapлений природний газ (СПГ) може знизити викиди CO₂, але має нижчу об'ємну енергетичну щільність (на 40 % нижчу за дизельне паливо, третина об'єму паливної системи). Рідкий водень, аміак і метанол мають ще нижчу об'ємну енергетичну щільність порівняно із СПГ (на 40–50 %). Техніко-економічні дослідження в середньостроковій перспективі показують потенційну економічну вигідність біопалива, проте його довгострокова конкурентоздатність є сумнівною через обмеження постачання та волатильність цін [9].

Енергоефективність морських суден значною мірою залежить від зовнішніх факторів та експлуатаційних параметрів. Оптимізація маршруту й диференту судна є ключовими стратегіями для зниження споживання палива та викидів.

Оптимізація маршруту передбачає врахування гідрометеорологічних умов, зокрема швидкості й напрямку вітру та течії, а також висоти хвилі, які чинять значний вплив на опір судна. Статичні методи визначення оптимальної швидкості плавання є менш ефективними через мінливість цих факторів. Динамічні підходи, що використовують дані про навколишнє середовище в реальному часі для оптимізації швидкості, демонструють потенціал скорочення споживання палива та викидів парникових газів до 28 % в ідеальних умовах, перевищуючи ефективність статичної оптимізації приблизно на 2 %.

Оптимізація диференту судна полягає у виборі оптимального кута нахилу корпусу відносно поздовжньої осі з урахуванням поточної осадки. Ефективне диферентування залежить від умов завантаження, швидкості судна, а також зовнішніх факторів. Застосування оптимального диференту може забезпечити скорочення споживання палива до 14 % для існуючих суден за мінімальних витрат. Особливо за досягнення оптимального розподілу ваги без використання водяного баласту, оскільки збільшення водотоннажності призводить до зростання опору та витрати палива. Застосування комплексних підходів, що поєднують оптимізацію маршруту й диференту, є перспективним напрямом підвищення енергоефективності судноплавства та зниження його екологічного впливу [3].

Формулювання цілей статті. Метою цієї статті є обґрунтування й апробація методологічного підходу до аналітичної оцінки ризиків та можливостей, пов'язаних із впровадженням заходів з енергоефективності на морському транспорті. Для досягнення цієї мети пропонується використати SWOT-аналіз як інструмент для прийняття управлінських рішень, продемонструвавши його застосування на конкретному прикладі – оцінці доцільності використання суднових паливних присадок.

Виклад основного матеріалу. Для розуміння проблеми викидів дизельних двигунів насамперед потрібно розглянути їхні причини та механізми. На відміну від бензинових двигунів, основною екологічною складністю дизельних

агрегатів є виділення значної кількості оксидів азоту (NOx) та твердих частинок. Ці забруднювачі формуються внаслідок складного процесу згоряння паливно-повітряної суміші всередині циліндра. Нерівномірний розподіл палива та повітря, зумовлений високим тиском впорскування й обмеженим часом на їхнє ефективне змішування, відіграє ключову роль у цьому процесі.

Згоряння в дизельному двигуні проходить дві головні стадії: попередньо змішану та дифузійно контрольовану. На першому етапі, що охоплює невелику частку палива, запалювання відбувається одночасно в багатьох точках, де співвідношення палива й повітря є оптимальним. Друга стадія забезпечує згоряння решти палива, яке продовжує впорскуватися, випаровуватися та змішуватися з повітрям. Швидкість цього процесу визначається швидкістю дифузії палива в повітря.

Утворення NOx відбувається переважно в зонах високої температури та надлишку кисню, які характерні для стехіометричних або злегка збіднених сумішей. Викиди вуглеводнів є наслідком неповного згоряння палива в зонах із недостатньою кількістю повітря, гасіння полум'я поблизу холодних стінок циліндра, а також випаровування палива, що потрапило на мастильну плівку. Низький рівень викидів чадного газу (CO) в дизельних двигунах пояснюється загальною тенденцією до використання збіднених паливно-повітряних сумішей і наявністю достатньої кількості кисню для його подальшого окислення до вуглекислого газу (CO₂). Тверді частинки утворюються через неповне згоряння важких фракцій палива, особливо за значних навантажень та високих обертів двигуна, а також унаслідок часткового згоряння мастила та проблем з ефективністю системи впорскування палива [10].

У контексті глобальної стратегії з декарбонізації морського транспорту важливим етапом стало впровадження обов'язкових стандартів енергоефективності. Починаючи з 2013 року, Міжнародна морська організація (ІМО) поступово запроваджувала нормативи, відомі як індекс енергоефективності проєктування (EEDI), який став основним критерієм для оцінки нових суден. Цей індекс був поетапно посилений відповідно до фаз регламенту, що дало змогу підвищити енергетичну ефективність судноплавства на міжнародному рівні. Так, згідно з Додатком 9 Резолюції Комітету із захисту морського середовища (MEPC) ІМО, індекс EEDI є мірою енергоефективності судна, дає змогу кількісно оцінити викиди CO₂ на кожную тонну вантажу, переміщену на морську милю, і є обов'язковим критерієм для проєктування нових суден. Нижче наведемо скорочену формулу розрахунку даного показника (1) [11]:

$$EEDI = \frac{\sum (P_i \cdot SFC_i \cdot CF_i)}{W \cdot V} \cdot f_j f_v f_e, \quad (1)$$

де: W – вантажопідйомність судна, т;

V – швидкість судна, милі/годину;

P_i – потужність двигунів (головних або допоміжних), кВт. У розрахунках EEDI використовується 75 % від номінальної встановленої потужності (MCR) головного двигуна;

SFC_i – питома витрата палива відповідного двигуна, г/кВт·год);

CF_i – коефіцієнт перетворення (викиди CO_2 на 1 т палива);

f_j – поправочний коефіцієнт для специфіки конструкції судна (наприклад, криголами);

f_i – поправочний коефіцієнт для обмежень місткості;

f_v – поправка на зниження швидкості в реальних морських умовах (хвилі, вітер);

f_e – коефіцієнт наявності інноваційних енергозберігаючих технологій.

Формула може змінюватися залежно від типу судна та його силової установки (наприклад, для суден із дизель-електричною установкою або гібридною силовою установкою можуть застосовуватися інші методи розрахунку).

Отже, вище було проаналізовано багатообіцяючі альтернативні види палива та заходи, які в майбутньому можуть стати ключем до більш економного й екологічного судноплавства. Проте поряд із цими напрямками існують і інші, не менш важливі підходи, котрі вже сьогодні можуть сприяти підвищенню енергоефективності та зменшенню впливу на довкілля. Одним із таких практичних і потенційно ефективних інструментів є використання присадок до традиційних видів палива.

Замість повного переходу до нової інфраструктури та технологій присадки дають можливість оптимізувати використання наявних ресурсів, покращуючи їхні характеристики та підвищуючи згоряння. Це, зі свого боку, може призвести до зниження витрат палива та шкідливих викидів. Таким чином, присадки виступають як ще один важливий елемент у загальній стратегії сталого розвитку морського транспорту, вивченню якого в попередніх джерелах було приділено недостатньо уваги.

Розглянемо детальніше механізми дії присадок для розуміння їх впливу на енергозбереження та зменшення викидів. Залежно від цього їх можна класифікувати за такими категоріями:

Присадки, котрі підвищують цетанове число. Цю категорію присадок розроблено для покращення займання дизельного пального. Ці засоби не тільки призводять до зростання цетанового числа, але й покращують змащення та знижують викиди NO_x . Останні розробки в галузі паливних присадок стосуються сполук на основі нітрогену та сукцинового ангідриду, що проявляють мультифункціональність, зокрема детергентні властивості. Експериментально підтверджено, що естери та пероксиди є ефективними агентами для підвищення цетанового числа; їхнє застосування навіть у низьких концентраціях істотно покращує ефективність процесу згоряння. Отже, інтеграція зазначених присадок сприяє оптимізації якісних характеристик пального, збільшенню експлуатаційного ресурсу двигуна та мінімізації негативного впливу на екосистему.

Альтернативні хімічні сполуки, включно з іншими алкільнітратами, ефірними нітратами, пероксидами й окремими нітрозосполуками, також демонструють потенціал як ефективні підсилювачі цетанового числа дизельного палива. Однак на цей час їхнє комерційне застосування є обмеженим. Важливо зазначити, що вплив цих менш поширених покращувачів цетанового числа на інші критично важливі експлуатаційні характеристики палива, зокрема термічну стабільність, залишається недостатньо дослідженим і потребує подальшого наукового вивчення.

Присадки, котрі виконують функцію очищення. У зоні паливних форсунок, яка піддається впливу високих температур у циліндрі двигуна, можливе утворення відкладень, що походять як із палива, так і з мастила. Інтенсивність цього процесу залежить від конструкції двигуна, характеристик палива та мастила, а також від умов його експлуатації. Надмірне накопичення відкладень здатне спотворити форму струменя палива, що впорскується (схему розпилення), що, зі свого боку, негативно впливає на ефективність змішування палива з повітрям. У деяких типах силових установок це може призвести до збільшення витрати палива та зростання рівня шкідливих викидів.

Для очищення паливних форсунок від існуючих відкладень або для підтримання їхньої чистоти на практиці застосовуються зазвичай беззольні полімерні мийні присадки. Механізм їхньої дії полягає у наявності полярної частини молекули, яка взаємодіє з відкладеннями та речовинами, що є їхніми попередниками, та неполярної частини, яка розчиняється в паливі. Завдяки такій будові присадка здатна розчиняти вже утворені відкладення й запобігати формуванню нових. Типовий діапазон концентрацій мийних добавок у паливі становить від 50 до 300 частин на мільйон (ppm – parts per million).

Присадки, котрі є каталізаторами згоряння. Каталітичні присадки до палива є важливим інструментом для оптимізації процесу згоряння та мінімізації шкідливих викидів. Експериментальні дослідження демонструють, що застосування комерційно доступних каталізаторів може призвести до значного зниження викидів твердих частинок (на рівні понад 16 %) і монооксиду вуглецю (на рівні близько 10 %). Проте слід зазначити, що в деяких випадках можливе незначне збільшення концентрації оксидів азоту (NOx) у відпрацьованих газах. Застосування присадок до мазутів, що містять поверхнево-активні речовини та підсилювачі згоряння, дає змогу досягти ефективності згоряння, що перевищує 80 %. Окремі композиції, розроблені на основі благородних металів, забезпечують функціонування трикомпонентного каталізу, спрямованого на конверсію токсичних компонентів відпрацьованих газів в екологічно безпечні сполуки.

У ролі каталізаторів горіння використовуються деякі металоорганічні сполуки. Додавання цих сполук до палива може дійсно зменшити викиди чорного диму, які виникають унаслідок неповного згоряння. Такі переваги найбільш значні в разі використання зі старими технологічними двигунами та силовими установками, які є значними утворювачами диму.

Присадки, котрі покращують змащування. Ці присадки застосовуються для компенсації знижених мастильних характеристик дизельних палив, що пройшли глибоке гідроочищення. Їхня молекулярна структура має полярну функціональну групу, яка демонструє високу афінність до металевих поверхонь. Завдяки цьому присадки формують тонку адсорбційну плівку на поверхні металу, яка виконує функцію граничного мастильного шару за контакту двох металевих елементів. Тобто їх дія спрямована на покращення змащувальних характеристик палива, мінімізацію зношування компонентів двигуна та пролонгацію його експлуатаційного ресурсу.

Присадки, котрі виконують функцію антиоксидантів. Одним із механізмів деградації палива є окислення, ініційоване взаємодією розчиненого в паливі кисню з реакційноздатними сполуками.

Крім окислення, нестабільність палива може бути спричинена кислотно-лужними реакціями. Для запобігання цим реакціям зазвичай застосовуються стабілізатори, які є сильними основними амінами. Їхня типова концентрація варіюється від 50 до 150 ppm. Механізм їхньої дії полягає у взаємодії зі слабкими кислотними сполуками, що призводить до утворення продуктів, які залишаються розчиненими в паливі та не вступають у подальші небажані реакції [10; 12].

Отже, дослідження показують, що присадки до дизельного палива можуть мати значний вплив на характеристики двигуна та викиди.

Зменшення викидів: застосування певних присадок, зокрема на основі марганцю, продемонструвало здатність знижувати викиди шкідливих речовин, як-от оксиди вуглецю (CO) та вуглеводні (HC). Однак деякі дослідження виявили збільшення викидів оксидів азоту (NOx) в разі використання певних присадок.

Зниження питомої витрати палива: покращення процесу згоряння за допомогою присадок може призвести до зниження питомої витрати палива, що є важливим фактором для зменшення споживання пального та викидів. Металеві присадки й антиоксиданти показали позитивні результати в цьому напрямі.

Підвищення потужності та крутного моменту: деякі присадки, наприклад на основі марганцю, можуть сприяти підвищенню потужності та крутного моменту двигуна завдяки покращенню процесу згоряння. Важливо зазначити, що оптимальна концентрація присадки є критичною для досягнення позитивного ефекту.

Шумові та вібраційні ефекти: дослідження показують, що використання певних металовмісних присадок може призвести до зменшення вібрації та шуму двигуна.

Зменшення затримки запалювання: присадки можуть впливати на затримку запалювання, що є часом між впорскуванням палива та початком згоряння. Зменшення затримки запалювання може покращити процес згоряння.

Зменшення викидів диму та непрозорості: деякі присадки сприяють покращенню розпилення палива та випаровування, що може призвести до зниження викидів диму й непрозорості [13].

Аналіз наявних даних і принципів функціонування присадок до палива свідчить про те, що оптимальний вибір присадки та її ефективна концентрація для конкретного виду палива не піддаються апіорному прогнозуванню. У силу складної взаємодії між хімічним складом базового палива, специфічними характеристиками двигуна й умовами його експлуатації універсальне рішення в цій сфері відсутнє.

Визначення найбільш дієвої присадки та її оптимального дозування є емпіричним завданням, що потребує проведення ретельних експериментальних досліджень на конкретній силовій установці судна. Ці дослідження повинні охоплювати всебічне оцінювання впливу різних типів присадок у широкому діапазоні концентрацій на ключові експлуатаційні параметри, як-от ефективність згоряння, рівень викидів шкідливих речовин, термічна стабільність палива та довговічність компонентів паливної системи. Лише на основі систематично отриманих експериментальних даних можна ідентифікувати найбільш ефективне рішення, що забезпечує оптимальні техніко-економічні й екологічні показники для конкретної комбінації палива та конкретної дизельної силової установки.

Найкраще цей факт демонструють практичні дослідження українських науковців Сагіна С. В., Заблоцького Ю. В., Сагіна А. С. [14]. Вони підтверджують, що наразі немає універсальних або чітко визначених рекомендацій щодо оптимальної концентрації паливних присадок у дизельному паливі. Як зазначено в проведених ними дослідженнях, навіть фірми-виробники присадок обмежуються вказівкою можливого діапазону концентрацій, залишаючи конкретний вибір кінцевому користувачу. Це пов'язано з великою кількістю змінних факторів: конструктивними особливостями двигунів, характеристиками базового палива, умовами експлуатації, режимами навантаження тощо.

Оптимальну концентрацію присадки потрібно визначати експериментальним шляхом для кожного конкретного випадку. Такий підхід дає змогу врахувати специфіку роботи суднових дизельних двигунів і забезпечити досягнення мінімальної питомої витрати палива, що безпосередньо впливає на економічність експлуатації.

Виходячи з вищевикладеного, вважаємо доцільним підкреслити, що оцінка результативності присадок не повинна обмежуватися суто кількісними вимірюваннями технічних параметрів. Хоча експериментальні дослідження є критично важливими для визначення оптимальних концентрацій та впливу на викиди й ефективність, повне розуміння доцільності застосування присадок потребує врахування ширшого спектра факторів. Тому нами пропонується використати метод якісного аналізу, а саме SWOT-аналіз, котрий дає змогу комплексно оцінити сильні та слабкі сторони застосування присадки, а також можливості й загрози, пов'язані з її впровадженням.

SWOT-аналіз – це методологічний інструмент стратегічного планування, призначений для системного аналізу внутрішніх і зовнішніх факторів, що впливають на об'єкт дослідження. Він передбачає ідентифікацію та структурування Strengths (сильних сторін), Weaknesses (слабких сторін), Opportunities (можливостей) та Threats (загроз). Сильні та слабкі сторони є внутрішніми атрибутами об'єкта, що піддаються контролю та можуть бути змінені. Можливості та загрози, навпаки, є зовнішніми факторами, що знаходяться поза контролем об'єкта, але здатні впливати на його розвиток і ефективність. Результати SWOT-аналізу використовуються для розробки стратегій, спрямованих на максимізацію сильних сторін і можливостей, а також мінімізацію слабких сторін та загроз. Цей метод забезпечує комплексну оцінку ситуації, сприяючи прийняттю обґрунтованих управлінських рішень.

На відміну від суто кількісного підходу, SWOT-аналіз дає змогу:

1) розглянути проблему багатовимірно – крім технічних переваг (наприклад, зниження витрати палива), він враховує економічні аспекти (вартість присадки, вплив на експлуатаційні витрати), екологічні наслідки (вплив виробництва й утилізації присадки), а також соціальні та регуляторні чинники;

2) виявити неочевидні зв'язки – SWOT-аналіз може виявити можливості для оптимізації застосування присадки (наприклад, синергія з іншими заходами енергозбереження) або потенційні загрози (наприклад, ризики, пов'язані з використанням неякісних присадок), які не завжди очевидні під час кількісного аналізу;

3) систематизувати інформацію для прийняття рішень – SWOT-аналіз надає структуровану рамку для організації та аналізу різнорідних даних, що полегшує процес прийняття обґрунтованих рішень щодо доцільності використання присадки в конкретних умовах експлуатації судна;

4) врахувати специфіку контексту – застосування SWOT-аналізу дає змогу адаптувати оцінку результативності присадки до конкретних потреб та цілей судноплавної компанії, враховуючи її флот, операційні маршрути, екологічну політику й економічні пріоритети.

Таким чином, поєднання кількісних експериментальних даних з якісним аналізом за допомогою SWOT-аналізу забезпечує більш глибоке та всебічне розуміння впливу присадок на ефективність та сталість судноплавства, сприяючи прийняттю оптимальних рішень і подальшому розвитку досліджень у цій важливій галузі. Слід підкреслити, що застосування запропонованого аналізу розглядається як додатковий методологічний підхід до оцінки енергоефективності. Він забезпечує можливість доцільності здійснення якісного аналізу, враховуючи комплекс індивідуальних параметрів, зокрема характеристики палива, присадок, силових установок, умови експлуатації та інші релевантні змінні. Таким чином, цей інструмент аналізу є, на нашу думку, ефективним для прийняття рішень в умовах багатофакторної комплексності.

У таблиці 1 наведено приклад застосування SWOT-аналізу для прийняття рішення щодо використання присадок (або їх певного виду) для суднового дизельного палива. Слід зазначити, що перелік позицій у кожному блоці не є вичерпним і кожна судноплавна компанія може ідентифікувати власні сильні та слабкі сторони. Отже, рішення щодо оптимального вибору приймаються на основі їхніх індивідуальних експлуатаційних умов. Для кожної компанії будуть визначені свої індивідуальні переваги та недоліки застосування добавок.

Проведений якісний аналіз дає змогу окреслити основні переваги, недоліки, можливості та загрози впровадження паливних присадок у суднову енергетичну систему. Водночас для підвищення об'єктивності та забезпечення можливості порівняльної оцінки ефективності запропонованого рішення доцільно перейти до кількісної інтерпретації результатів SWOT-аналізу.

Із цією метою можна використати чисельну матрицю, де кожному фактору присвоюється вага (σ_i) – його відносна важливість, та оцінка впливу (q_i) – ступінь його позитивного або негативного ефекту. Орієнтовний приклад кількісної інтерпретації даного аналізу наведено в таблиці 2.

Для чіткої візуалізації вихідних та отриманих розрахункових даних, можна розглянути рис. 1.

Підбивши підсумок SWOT-аналізу з діаграми робимо висновок: сума позитивних коефіцієнтів – 0,417; сума негативних коефіцієнтів – 0,259; загальний SWOT-рейтинг – 0,158. Загальне значення > 0 свідчить про загальну доцільність впровадження технології. Загальну ефективність можна визначити таким чином (формула 2):

$$SWOT_{\text{аналіз}} = \sum \sigma_i \cdot q_i \quad (2)$$

Таблиця 1

**SWOT-аналіз: фактори впливу на рішення
щодо використання присадок у судновому паливі**

Сильні сторони (Strengths)	Слабкі сторони (Weaknesses)
1. Потенційне зниження витрати палива (до X%). 2. Можливе зменшення викидів шкідливих речовин (CO, HC, PM). 3. Покращення експлуатаційних характеристик двигуна (потужність, прийомистість). 4. Збільшення терміну служби двигуна та паливної системи (завдяки зменшенню відкладень та зносу). 5. Відносна простота впровадження порівняно з модернізацією або переходом на альтернативне паливо. 6. Оптимізація використання наявного палива й інфраструктури. 7. Зменшення зносу деталей паливної системи. 8. Покращення низькотемпературних властивостей палива. 9. Зниження шумності роботи двигуна	1. Вартість присадок та вплив на загальні експлуатаційні витрати. 2. Неоднозначність результатів залежно від типу двигуна, палива та умов експлуатації. 3. Ризики використання неякісних або несумісних присадок (пошкодження двигуна). 4. Необхідність ретельного вибору присадок, що відповідають вимогам виробника. 5. Можливі екологічні наслідки виробництва й утилізації присадок. 6. Потреба в експериментальних дослідженнях для визначення оптимальної присадки та дозування. 7. Складність контролю якості та ефективності присадок. 8. Обмеженість інформації про довгострокові наслідки використання. 9. Потенційні проблеми із сумісністю з різними типами ущільнень і матеріалів
Можливості (Opportunities)	Загрози (Threats)
1. Посилення екологічних норм і вимог ІМО. 2. Підвищення вартості традиційних видів палива. 3. Розвиток нових, більш ефективних та екологічно чистих присадок. 4. Можливість синергії з іншими заходами енергозбереження (наприклад, оптимізація маршруту). 5. Збільшення попиту на екологічно чисті судна та перевезення. 6. Розширення ринку присадок завдяки зростанню екологічної свідомості. 7. Вартість використання присадок може бути нижчою за вартість модифікації силової установки судна з метою енергозбереження. 8. Можливість отримання податкових пільг або субсидій за використання екологічно чистих технологій	1. Зростання цін на присадки. 2. Розробка та впровадження альтернативних технологій та видів палива. 3. Недостатня обізнаність судновласників про переваги присадок. 4. Поява на ринку неякісної продукції. 5. Обмеженість досліджень щодо довгострокових ефектів використання присадок. 6. Регуляторні обмеження на використання певних типів присадок (наприклад, металовмісних). 7. Опір змінам з боку консервативних судновласників. 8. Ризик непередбачених побічних ефектів від використання нових присадок

Висновки та перспективи подальших досліджень у цій галузі. На основі проведеного дослідження можна зробити такі висновки.

1. Прийняття рішень щодо оптимізації енергоефективності на морському транспорті є складною багатофакторною задачею, що потребує не лише техніко-економічних розрахунків, а й комплексного аналізу супутніх ризиків і можливостей. Існуючі методи, а саме уповільнення суден, модернізація обладнання чи перехід на альтернативне паливо, мають значний потенціал, але пов'язані з високими інвестиціями й операційними ризиками.

Таблиця 2

**Приклад кількісної оцінки SWOT-аналізу
ефективності використання паливних присадок**

Категорія	Фактор	Вага (σ_i)	Оцінка (q_i)	Добуток ($\sigma_i \times q_i$)
V	Зменшення витрати пального (до 4,7 %)	0,15	0,9	0,135
D	Покращення роботи двигуна та зниження викидів	0,10	0,8	0,080
M	Відсутність потреби в дорогій модернізації	0,08	0,7	0,056
W	Неоднозначність результатів залежно від умов	0,12	-0,6	-0,072
S	Вартість присадок	0,10	-0,5	-0,050
R	Ризик несумісності з матеріалами двигуна	0,08	-0,4	-0,032
P	Посилення екологічних стандартів IMO	0,10	0,9	0,090
Z	Синергія з іншими заходами енергозбереження	0,08	0,7	0,056
T	Розвиток альтернативних технологій	0,10	-0,6	-0,060
Y	Ризик появи неякісної продукції на ринку	0,09	-0,5	-0,045

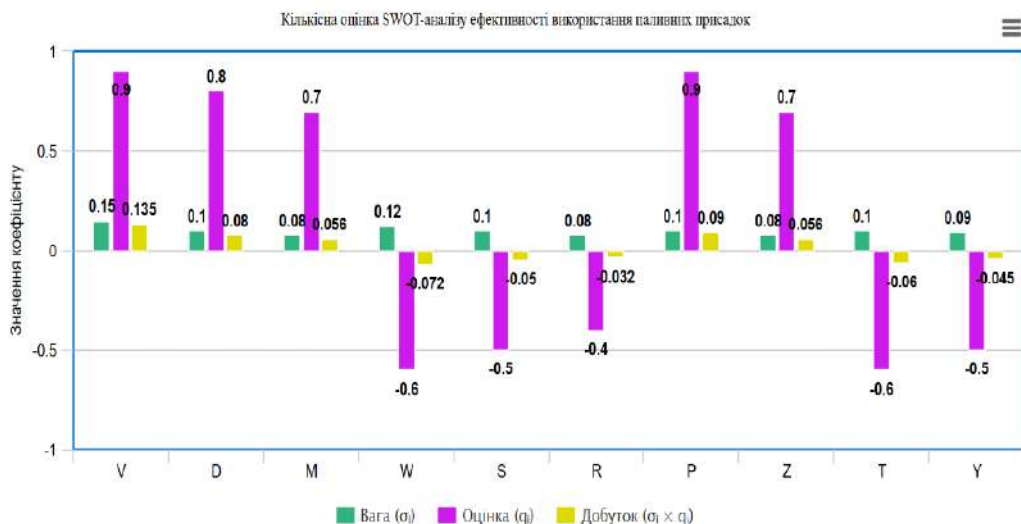


Рис. 1. Приклад кількісної інтерпретації оцінки SWOT-аналізу ефективності використання паливних присадок

2. У статті було запропоновано й апробовано методологічний підхід, що базується на SWOT-аналізі, як ефективний інструмент для аналітичної оцінки доцільності впровадження конкретних енергоефективних технологій. Цей метод дає змогу систематизувати внутрішні (сильні та слабкі сторони) та зовнішні (можливості й загрози) фактори, що є ключовим елементом управління ризиками.

3. На прикладі застосування паливних присадок було продемонстровано, що SWOT-аналіз забезпечує не тільки якісну, але й кількісну оцінку. Проведений розрахунок показав, що сума позитивних факторів (0,417) перевищує суму негативних (-0,259), а загальний SWOT-рейтинг становить 0,158. Позитивне значення рейтингу свідчить про обґрунтованість упровадження цієї технології в конкретних умовах, надаючи судновласнику формалізовану основу для прийняття рішення.

4. Таким чином, головним висновком роботи є не стільки підтвердження ефективності присадок, скільки демонстрація SWOT-аналізу як дієвого аналітичного інструменту для оцінки ризиків у сфері енергоефективності морських перевезень. Цей підхід може бути екстрапольований на оцінку інших технологій і заходів, що робить його універсальним.

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні застосування цієї методології для порівняльного аналізу різних енергоефективних рішень (наприклад, присадки та slow steaming або модернізація корпусу судна та встановлення роторів Флеттнера) для різних типів суден та операційних маршрутів, що дасть змогу розробити комплексні стратегії управління ризиками в морських мультимодальних перевезеннях.

ЛІТЕРАТУРА

1. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL). Режим доступу: URL: [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx) (дата звернення: 25.07.2025).
2. Schnurr R.E.J., Walker T.R. Marine Transportation and Energy Use. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.09270-8> (дата звернення: 25.07.2025).
3. Tadros M., Ventura M., Soares C. G. Review of current regulations, available technologies, and future trends in the green shipping industry. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 280. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114670> (дата звернення: 25.07.2025).
4. Barreiro J., Zaragoza S., Diaz-Casas V. Review of ship energy efficiency. *Ocean engineering*. 2022. Vol. 257. 111594. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111594> (дата звернення: 25.07.2025).
5. Benefits of slow steaming in realistic sailing conditions along different sailing routes / A. Farkas et al. *Ocean engineering*. 2023. Vol. 275. 114143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114143> (дата звернення: 25.07.2025).
6. Bouman E.A. et al. State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. *Transportation research part D: transport and environment*. 2017. Vol. 52. P. 408–421. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.022> (дата звернення: 25.07.2025).
7. Kondratenko A.A. et al. Existing technologies and scientific advancements to decarbonize shipping by retrofitting. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2025. Vol. 212. 115430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115430> (дата звернення: 25.07.2025).
8. Manikandan S., Vickram S., Devarajan Y. Cutting-edge technologies: biofuel innovations in marine propulsion systems to lower black carbon emissions. *Results in engineering*. 2025. Vol. 25. 104095. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104095> (дата звернення: 25.07.2025).

9. Issa M., Ilinca A., Martini F. Ship energy efficiency and maritime sector initiatives to reduce carbon emissions. *Energies*. 2022. Vol. 15. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15217910> (дата звернення: 25.07.2025).
10. Daud S., Hamidi M.A., Mamat R. A review of fuel additives' effects and predictions on internal combustion engine performance and emissions. *AIMS energy*. 2022. Vol. 10 (1). P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.3934/energy.2022001> (дата звернення: 25.07.2025).
11. Annex 9 resolution мепс.364 (79): 2022 Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships. Режим доступу: URL: [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364\(79\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364(79).pdf) (дата звернення: 25.07.2025).
12. Elkelawy M., Aly Farag M., Seleem H.E. Enhancing Diesel Engine Power Plant Efficiency and Cutting Emissions with Commercial Fuel Additives in Generator Systems. *Pharos Engineering Science Journal*. 2025. Vol. 2 (1). P. 37–46. DOI: <https://doi.org/10.21608/pej.2025.352985.1012> (дата звернення: 25.07.2025).
13. Cline C., Micklow G. Compilation of Conventional Fuel Additives. A literature review of chemical additives in diesel and biodiesel fuels for improved combustion. *Journal of multidisciplinary engineering science and technology (JMEST)*. 2020. Vol. 7, Issue 5. P. 11791–11807. Режим доступу: URL: https://www.researchgate.net/publication/341623214_A_Compilation_of_Conventional_Fuel_Additives_A_literature_review_of_chemical_additives_in_diesel_and_biodiesel_fuels_for_improved_combustion (дата звернення: 25.07.2025).
14. Сагін С. В., Заблоцький Ю. В., Сагін А. С. Підвищення економічності роботи судових середньообертових дизелів. *Водний транспорт*. 2025. № 1 (42). DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20> (дата звернення: 25.07.2025).

REFERENCES

1. International convention for the prevention of pollution from ships (MARPOL) (n.d.). International Maritime Organization. [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx).
2. Schnurr, R.E.J., & Walker, T.R. (2019). Marine transportation and energy use. *Reference module in earth systems and environmental sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.09270-8>.
3. Tadros, M., Ventura, M., & Soares, C.G. (2023). Review of current regulations, available technologies, and future trends in the green shipping industry. *Ocean Engineering*, 280, 114670. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114670>.
4. Barreiro, J., Zaragoza, S., & Diaz-Casas, V. (2022). Review of ship energy efficiency. *Ocean Engineering*, 257, 111594. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111594>.
5. Farkas, A., Degiuli, N., Martić, I., & Mikulić, A. (2023). Benefits of slow steaming in realistic sailing conditions along different sailing

- routes. *Ocean Engineering*, 275, 114143. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114143>.
6. Bouman, E.A., Lindstad, E., Rialland, A.I., & Strømman, A.H. (2017). State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 408–421. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.022>.
 7. Kondratenko, A.A., Zhang, M., Tavakoli, S., Altarriba, E., & Hirdaris, S. (2025). Existing technologies and scientific advancements to decarbonize shipping by retrofitting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 212, 115430. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115430>.
 8. Manikandan, S., Vickram, S., & Devarajan, Y. (2025b). Cutting-edge technologies: Biofuel innovations in marine propulsion systems to lower black carbon emissions. *Results in Engineering*, 25, 104095. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104095>.
 9. Issa, M., Ilinca, A., & Martini, F. (2022). Ship energy efficiency and maritime sector initiatives to reduce carbon emissions. *Energies*, 15 (21), 7910. <https://doi.org/10.3390/en15217910>.
 10. Daud, S., Hamidi, M.A., & Mamat, R. (2022). A review of fuel additives' effects and predictions on internal combustion engine performance and emissions. *AIMS Energy*, 10 (1), 1–22. <https://doi.org/10.3934/energy.2022001>.
 11. Annex 9 resolution mepc.364(79), 2022 Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships (n.d.). [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364\(79\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364(79).pdf).
 12. Elkelawy, M., Aly Farag, M., & Seleem, H.E. (2025). Enhancing diesel engine power plant efficiency and cutting emissions with commercial fuel additives in generator systems. *Pharos Engineering Science Journal*, 2 (1), 37–46. <https://doi.org/10.21608/pesj.2025.352985.1012>.
 13. Cline C., Micklow G. (2020) A Compilation of Conventional Fuel Additives. A literature review of chemical additives in diesel and biodiesel fuels for improved combustion. *Journal of multidisciplinary engineering science and technology (JMEST)*, 7 (5), 11791–11807. URL: https://www.researchgate.net/publication/341623214_A_Compilation_of_Conventional_Fuel_Additives_A_literature_review_of_chemical_additives_in_diesel_and_biodiesel_fuels_for_improved_combustion.
 14. Sagin, S.V., Zablotskyi, Yu.V., & Sagin, A.S. (2025). Pidvyshchennia ekonomichnosti roboty sudnovykh serednoobertovykh dyzeliv [Improving the efficiency of medium-speed marine diesel engines *Vodnij Transport*, 1 (42), 166–179. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20>.

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації: 30.10.2025