

УДК 656.6-042.5/.8:502/504

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-153-166

ARTICLE HISTORY

Received 21.04.2026

Accepted 11.05.2026

Суворов Петро Семенович¹, Тарасенко Тетяна Владиславівна²Секретаріат Дунайської Комісії¹

Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»,

pjotr.suvorov@danubecommission.org¹, tarasenko@dinuoma.com.ua²

СЦЕНАРНИЙ ПІДХІД ДО ПРОГНОЗУВАННЯ ПЕРЕХОДУ ДО ЕКОНАВІГАЦІЇ

Petro Suvorov¹, Tetyana Tarasenko²Secretariat of the Danube Commission¹Danube institute of National university «Odessa Maritime Academy»²,pjotr.suvorov@danubecommission.org¹, tarasenko@dinuoma.com.ua

SCENARIO APPROACH TO FORECASTING THE TRANSITION TO ECO-NAVIGATION

Резюме. Нові правила ЄС та ІМО стосовно вимог до викидів парникових газів суттєво вплинуть на судноплавство, зумовлюючи значні фінансові наслідки залежно від обраної стратегії дотримання вимог для конкретного судна, включаючи застосування технології dual-fuel. У дослідженні змодельовано сценарії переходу до еконавігації на прикладі універсального суховантажного середньотоннажного судна без його модернізації з урахуванням додавання сумісних біо-палив (такий підхід може бути застосовано для транспортних суден будь-яких типів). На перших етапах після набуття чинності нових нормативних значень викиди ПГ відповідають встановленим вимогам. Штрафні санкції розпочнуться лише на третьому етапі скорочень нормативів. Для судовласника, який експлуатує декілька однотипних суден такий аналіз дає розуміння шляхів оптимізації витрат та доцільності об'єднання відповідності, що робить застосування сумісних екологічних видів палива економічно виправданим.

Summary. *New EU and IMO greenhouse gas (GHG) regulations will significantly affect shipping, creating substantial financial implications for applying different compliance strategies, including dual-fuel technologies. This study considers a transition scenario to eco-navigation using the case of a medium-sized bulk carrier without retrofitting, but with the integration of compatible biofuels – an approach applicable to vessels of various types. In the initial phases following the introduction of new limits, the vessel's GHG emissions remain compliant, with penalties arising only in the third stage of reductions. For shipowners operating several similar vessels, such analysis provides insights into cost optimization and the economic justification of compliance pooling, thereby supporting the adoption of compatible alternative fuels.*

Сучасне судноплавство традиційно стоїть перед постійними викликами, пов'язаними з підвищенням вимог забезпечення надійності, безпеки перевезень та забезпечення його економічності. Стрімкий технологічний розвиток сприяє впровадженню новітніх засобів контролю, аналізу та моніторингу руху суден для забезпечення найвищого рівня економічної функціональності та попередження можливих неполадок. Серед нових викликів, які мають особливу увагу для розгляду, слід підкреслити також проблему конвенційного забезпечення енергоефективності роботи флоту, яка стає одним з ключових завдань у сфері світового судноплавства.

Введені на початку 2020-х років Директиви та інші акти Європейського Союзу (ЄС) щодо скорочення викидів парникових газів від суден внутрішнього плавання [1], Регламент (ЄС) 2023/1805 від 13 вересня 2023 року щодо використання відновлюваних та низьковуглецевих видів палива в морському секторі та про внесення змін до Директиви (ЄС) 2019/944 і Регламенту (ЄС) 2019/943 (далі за текстом застосовується неформальна коротка назва – *FuelEU Maritime*) для морських суден, а також оновлена Стратегія ІМО щодо скорочення викидів парникових газів від міжнародного судноплавства створюють узгоджену систему регулювання, яка матиме суттєвий вплив на галузь судноплавства, зокрема через посилення моніторингу та запровадження додаткових фінансових зобов'язань для судновласників. За наявними оцінками та прикладними розрахунками сценаріїв експлуатації флоту такі регуляторні заходи призводять до відчутного збільшення сукупних витрат, що зумовлює необхідність завчасного формування стратегій реагування, спрямованих на оптимізацію витрат та врахування комерційного впливу екологічних вимог на економічність перевезень.

Питання оцінювання енергоефективності та екологічності роботи флоту в умовах енергетичного переходу для внутрішнього судноплавства та морських перевезень розглядаються у низці сучасних робіт. У роботі [1] проаналізовано підходи до оцінювання енергоефективності суден та впливу режимів експлуатації на викиди парникових газів у контексті переходу на альтернативні види палива. У зарубіжних дослідженнях значну увагу приділено впливу впровадження регуляторних режимів ЄС, зокрема *FuelEU Maritime* та Європейської системи торгівлі викидами парникових газів (*EU Emissions Trading System, EU ETS*), на структуру витрат судновласників і формування стратегій дотримання вимог. У документі [2] представлено сценарний аналіз різних стратегій відповідності *FuelEU Maritime* для нового балкера, включно з поєднанням заходів з підвищення енергоефективності, використанням альтернативних палив та механізмами об'єднання відповідності. Практичні аспекти формування цін на традиційні та альтернативні палива для морського транспорту наведено в галузевих джерелах, а методичні підходи до розрахунку викидів ПГ у перерахунку на CO₂-еквівалент – у матеріалах Рамкової конвенції ООН про зміну клімату. Регуляторний контекст скорочення викидів від судноплавства в ЄС додатково висвітлено в інформаційних матеріалах Єврокомісії, де окреслено роль морського сектору в досягненні кліматичних цілей Союзу.

Основна мета вимог зводиться до поступового ступінчастого зниження інтенсивності викидів парникових газів в кінцевому підсумку до 80 % з 2050 року. Судновласникам надається кілька гнучких механізмів для досягнення дотримання вимог законодавства (Регламенту), включаючи банківські операції, запозичення та об'єднання, а також штрафні виплати (очікується, що варіант нічого не робити та сплатити штраф буде дорожчим, ніж інші стратегії відповідності).

Викиди парникових газів розраховуються, включаючи викиди, пов'язані з видобутком, культивуванням, виробництвом і транспортуванням палива, на додаток до викидів від спалювання або перетворення енергії на борту судна (концепція *well-to-wake*). Також включено система живлення береговою енергією, що подається на судно. Крім того, існують коефіцієнти винагороди за використання певних відновлюваних видів палива (*RFNBO*) (наприклад, вводяться спеціальні для суден з вітровими силовими установками).

У структурах ЄС системно формується та постійно розвивається складне нормативне регулювання питань скорочення викидів парникових газів від судноплавства: у 2024 році в рамках пакету *Fit for*

55 судноплавство вже включено до Системи торгівлі викидами ЄС (ETS), а з 2025 року набув чинності Морський регламент *FuelEU*. Щоб гарантувати досягнення цілей оновленої Стратегії ІМО щодо скорочення викидів парникових газів від міжнародного судноплавства (2023 *IMO GHG Strategy*), Організація розробляє набір середньострокових заходів, що включатиме, зокрема, глобальний паливний стандарт та економічний механізм ціноутворення на викиди парникових газів. Питання конкретних параметрів і строків запровадження цих заходів перебуває на стадії міждержавних переговорів, на момент підготовки статті остаточні нормативні рішення ще не ухвалено, а регіональні режими, зокрема *FuelEU Maritime* та *EU ETS*, фактично формують основне регуляторне середовище для судноплавства.

Враховуючи тривалий термін служби суден, судовласники повинні підготуватися до запровадження майбутніх правил, що встановлюють витрати, а також обмеження на інтенсивність викидів парникових газів у паливі. Як кожне окреме судно, так й весь склад флоту необхідно підготувати до роботи у майбутньому, в якому викиди будуть мати прогнозовану вартість. Технічні та економічні чинники цієї проблеми тісно взаємопов'язані, а саме – краща підготовка технічних аспектів призведе до відсутності або нівелювання штрафів. У такій ситуації судовласникам буде важливо мати заздалегідь правильні стратегії та інструменти рішення цієї проблеми. Мета дослідження – сценарно оцінити техніко-економічні наслідки переходу існуючих вантажних суден до еконавігації в умовах запровадження вимог *FuelEU Maritime* та ІМО щодо скорочення викидів ПГ.

Задачі дослідження – аналіз чинних вимог ЄС та ІМО щодо скорочення викидів ПГ від судноплавства, розроблення та розрахунок кількох сценаріїв експлуатації суховантажного судна з різними стратегіями судовласника, оцінювання їхніх сукупних витрат на паливо, платежі за викиди й штрафи протягом розрахункового періоду та порівняння отриманих результатів для виявлення економічно доцільних варіантів переходу до еконавігації.

З 1 січня 2025 року набув чинності *FuelEU Maritime*, згідно якого судна понад 5000 GT, які перевозять вантажі або пасажирів у комерційних цілях у Європейському Союзі / Європейській економічній зоні (ЄЕЗ), повинні відповідати щорічним вимогам щодо інтенсивності викидів парникових газів (ПГ) *well-to-wake*, тобто за повний життєвий цикл від видобутку пального до його кінцевого використання. Інтенсивність парникових газів, гСО₂/МДж:

$$GHG_{intens} = \frac{Total\ GHG\ emissions}{Total\ energy\ from\ fuels + Total\ shore\ power + Rew_{RFNBO}} \times f_{wind},$$

де *Total GHG emissions* – загальні викиди парникових газів, гCO₂; *Total energy from fuels* – загальна кількість використаної енергії палив, МДж; *Total shore power* – загальна кількість використаної енергії від берегового постачання, МДж; *Rew_{RFNBO}* – винагородження за використання певних поновлюваних видів альтернативних палив, МДж; *f_{wind}* – безрозмірний коефіцієнт винагородження за використання вітрових силових установок.

Викиди парникових газів (чисельник у формулі) розраховуються, включаючи викиди, пов'язані з видобутком, культивуванням, виробництвом і транспортуванням палива, на додаток до викидів від спалювання або перетворення енергії на борту судна. До розрахунку кількості енергії (знаменник формули) крім загальної енергії від спалювання пального включено живлення береговою енергією, що подається на судно. Крім того, існують коефіцієнти винагороди за використання певних відновлюваних видів палива (*RFNBO*) і для суден з вітровими силовими установками.

Вимоги починаються зі зниження інтенсивності викидів парникових газів на 2 % протягом 2025 – 2029 років відносно середньої інтенсивності викидів парникових газів у 2020 році. Потім це цільове скорочення збільшується до 6 % протягом 2030 – 2034 років і далі прискорюється: 14,5 % з 2035 року, 31 % з 2040, 62 % з 2045 і, нарешті, 80 % з 2050 року. Судновласникам надається кілька гнучких механізмів для досягнення дотримання вимог законодавства, включаючи банківські операції, запозичення та об'єднання, а також штрафні виплати (очікується, що варіант нічого не робити та сплатити штраф буде дорожчим, ніж інші стратегії відповідності).

Серед усіх зацікавлених сторін найбільший регуляторний та фінансовий тягар припадає на судновласників, чії судна повинні щорічно звітувати перед компетентними органами держав прапора та прибережних держав (адміністраціями, уповноваженими органами контролю за виконанням вимог *FuelEU Maritime*, *EU ETS* та інших екологічних регуляторних режимів). При сталій роботі флоту можна спробувати оцінити вартість подальшої роботи в межах ЄС / ЄЗ існуючих суден. Подібний аналіз був зроблений для гіпотетичного нового балкера *Dw* = 80000 т, якій умовно введений в експлуатацію з початком дій нових вимог *FuelEU Maritime* і працюватиме 20 років, тобто до 2044 року включно [2]. Визначено кілька стратегій, починаючи з «не робити нічого та платити штраф» і далі поступово

збільшуючи заходи з підвищення енергоефективності, додавання, наприклад, *bio-MGO* у звичайні двигуни, використання інших альтернативних видів палива, берегового живлення тощо. Ці стратегії в середньому пропонують, порівняно зі стратегією *bio-MGO*, економію до 16 %, або 21 млн. дол. США. Також у роботі [2] оцінюється можливість об'єднання відповідності, яке має потенціал інструменту для розподілу витрат між суднами, які працюють у повній, частковій відповідності до вимог *FuelEU Maritime*, або зовсім не відповідають таким вимогам. Це допомагає запустити реальний бізнес-кейс для судна, яке повністю використовує свою потужність на екологічному паливі [5].

В той же час, для судновласників, які до 2025 року деякий час вже працювали на ЄС / ЄЕЗ, та мають судна, побудовані раніше введення в дію згаданих вимог, актуально мати розуміння перспектив для існуючих суден. Застосуємо аналогічний підхід для середньотоннажного універсального суховантажного судна $D_w = 57000$ т 2012 року побудови та введення в експлуатацію (табл. 1). Сучасні вимоги до енергоефективності та екологічності на час введення в експлуатацію цього судна ще не застосовувалися. Зазначимо також, що прив'язка до саме такого типу судна умовна, тобто такий підхід може бути використаним для транспортних суден будь-яких типів тоннажем понад 5000 GT.

Таблиця 1
Експлуатаційні характеристики судна

Дедвейт	57 000 т
Рік побудови	2012
Термін експлуатації за чинними вимогами <i>FuelEU Maritime</i>	13 років з 2025 по 2037 включно
Середньорічна витрата палива, еквівалентного MGO, у тому числі:	14700 т (632100 ГДж)
в рейсі	14500 т (623500 ГДж)
у причалу	200 т (8600 ГДж)
Район експлуатації	50 % в межах ЄС / ЄЕЗ

Розглянуті варіанти експлуатації цього судна без суттєвої модернізації (табл. 2), тільки з доданням біопалива, сумісного зі звичайним паливом викопного походження. Складніші варіанти

застосування альтернативних палив (метанол, амоній, *LNG*), також можуть бути розглянуті у подальшому.

Таблиця 2

Варіанти експлуатації судна

Позначення	Опис стратегії судновласника	Паливо або еквівалент палива
1	Без модернізації з оплатою штрафів	MGO
2	Без модернізації, з застосуванням заходів з енергоефективності, з оплатою штрафів	MGO
3	Використання додатково біо-MGO	MGO / біо-MGO
4	Використання додатково біо-MGO, з застосуванням заходів з енергоефективності	MGO / біо-MGO
5	Використання додатково біо-MGO, з підключенням до берегового живлення	MGO / біо-MGO

Також зауважимо, що розглядається експлуатація судна у режимі 50 / 50, тобто тільки 50 % часу рейсів судно перебуває в межах зони ЄС / ЄЕЗ.

Розрахунок вартості використаного за період експлуатації палива не може бути виконаним з урахуванням коливань цін на ринку палив. Але для оцінки стратегій вважається за доцільне прийняти умовно постійні значення вартості *MGO* на рівні 1276,50 долл. США / т; *bio-MGO* (як приклад) 856,50 долл. США / т – відповідно до цін у Роттердамі (*Plattz Rotterdam*) на 24.04.2026 [3]. Для розрахунку кількісних показників викидів ПГ у еквіваленті CO₂ використано калькулятор Секретаріату *UNFCC (United Nations Framework Convention on Climate Change)* [4]. Розміри штрафних виплат відповідають розрахунковій схемі *FuelEU Maritime*. Розміри внесків до фонду Європейської системи торгівлі викидами (*EU Emissions Trading System (ETS)*) відповідають умовній вартості 100 долл. США за 1 т викидів у еквіваленті CO₂ без урахування ринкових коливань.

Результати оцінки представлені у вигляді діаграм на рис. 1 – 5 та у порівняльній табл. 3.

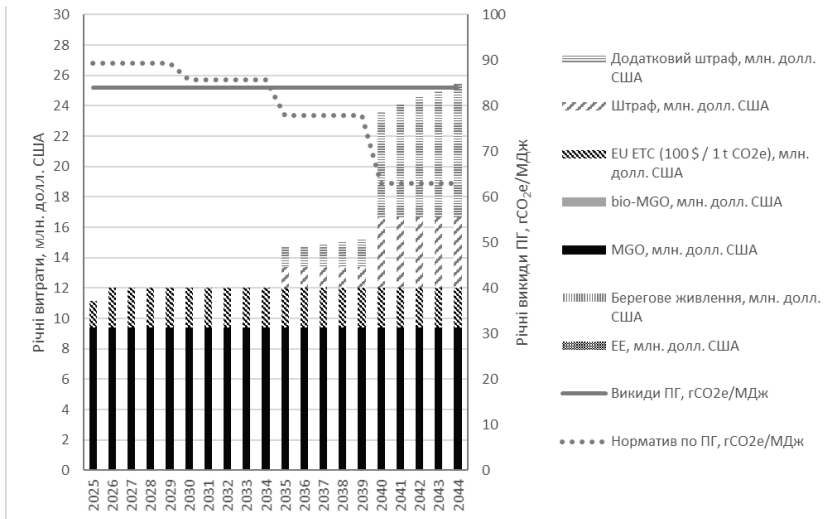


Рис. 1. Стратегія 1 (без модернізації з оплатою штрафів)

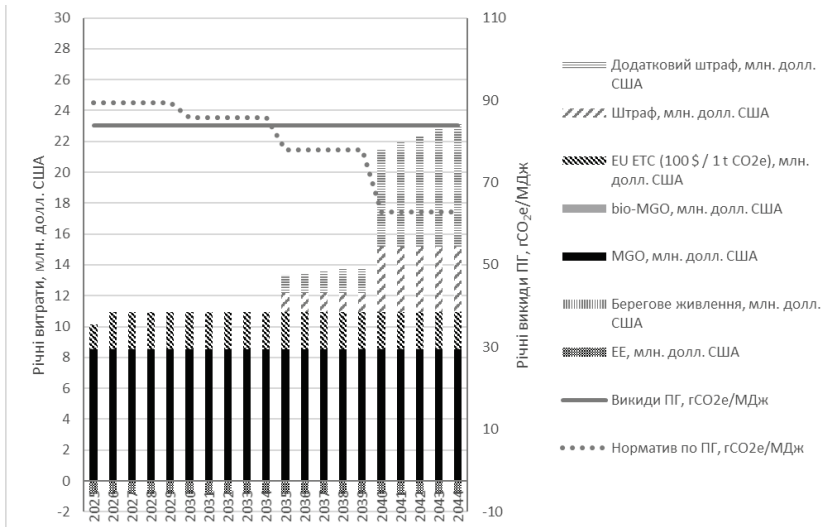


Рис. 2. Стратегія 2 (без модернізації, з застосуванням заходів з енергоефективності, з оплатою штрафів)

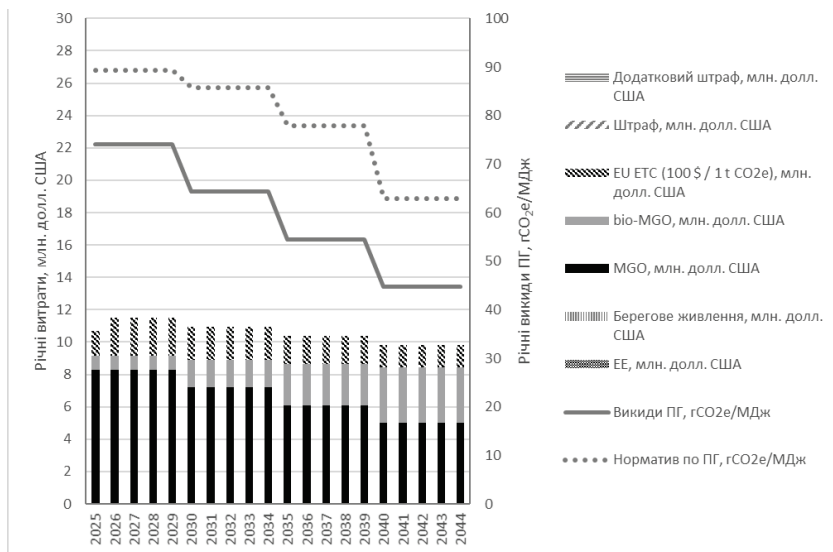


Рис. 3. Стратегія 3 (використання додатково біо-MGO)

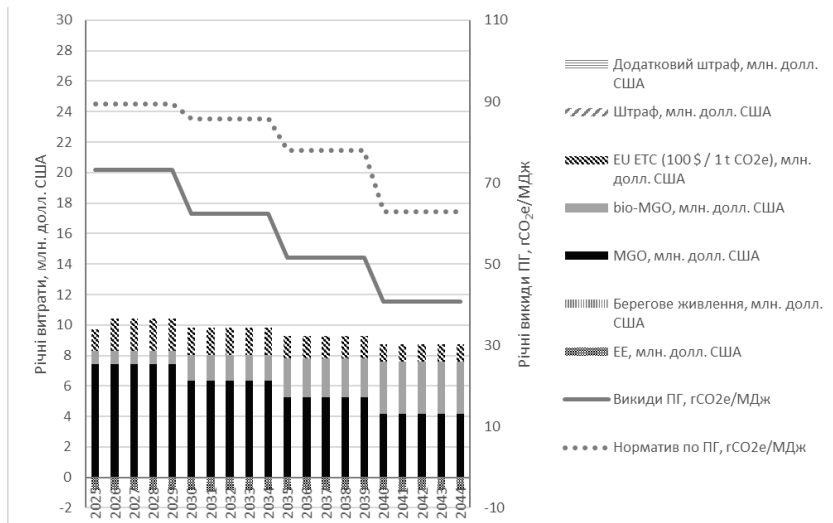


Рис. 4. Стратегія 4 (використання додатково біо-MGO, з застосуванням заходів з енергоефективності)

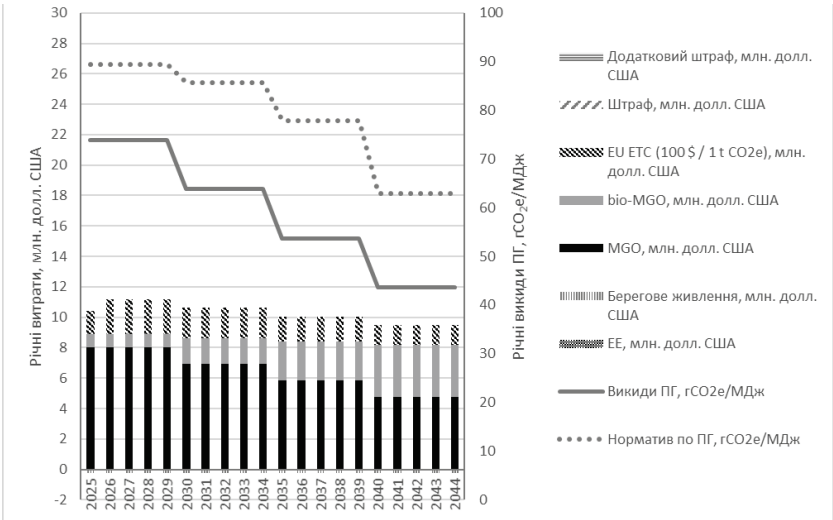


Рис. 5. Стратегія 5 (використання додатково біо-MGO, з підключенням до берегового живлення)

Таблиця 3

Зведена таблиця результатів порівняння можливих стратегій судновласника

Номер стратегії	Найменування показника	Оціночна вартість за 2026 -2044 р., млн. долл. США	Загальна вартість за 2026 - 2044 р., млн. долл. США	Накопичена невідповідність, тCO ₂ e
1	Заходи з енергоефективності	0	305,937	-33285
	Берегове живлення	0		
	Витрати на MGO	178,263		
	Витрати на біо-MGO	0		
	Внески до EU ETS	50,420		
	Штрафні витрати	29,841		
	Додатковий штраф	47,413		

Номер стратегії	Найменування показника	Оціночна вартість за 2026 -2044 р., млн. долл. США	Загальна вартість за 2026 - 2044 р., млн. долл. США	Накопичена невідповідність, тCO _{2e}
2	Заходи з енергоефективності	-16,044	262,363	-30290
	Берегове живлення	0		
	Витрачене MGO	162,220		
	Витрачене біо-MGO	0		
	Внески до <i>EU ETS</i>	45,886		
	Штрафні витрати	27,156		
	Додатковий штраф	43,145		
3	Заходи з енергоефективності	0	201,599	82
	Берегове живлення	0		
	Витрачене MGO	124,435		
	Витрачене біо-MGO	41,969		
	Внески до <i>EU ETS</i>	35,195		
	Штрафні витрати	0		
	Додатковий штраф	0		
4	Заходи з енергоефективності	-16,044	164,974	71
	Берегове живлення	0		
	Витрачене MGO	108,391		
	Витрачене біо-MGO	41,969		
	Внески до <i>EU ETS</i>	30,658		
	Штрафні витрати	0		
	Додатковий штраф	0		
5	Заходи з енергоефективності	0	190,525	82
	Берегове живлення	-4,851		
	Витрачене MGO	119,584		
	Витрачене біо-MGO	41,969		
	Внески до <i>EU ETS</i>	33,823		
	Штрафні витрати	0		
	Додатковий штраф	0		

Враховуючи потенційні фінансові наслідки різних технічних рішень, а також враховуючи можливості гнучкого підходу до

застосування тих чи інших технологій, кожній стороні доцільно заздалегідь оцінювати свої потенційні зобов'язання та привілеї, а також те, як вони можуть вплинути на їхні комерційні угоди та угоди щодо відповідності. Якщо такі умови не передбачені у контрактах, усі витрати лягають на судновласника, або оператора судна, або іншої організації, особи, відповідальної за впровадження Міжнародної системи управління безпекою (у контексті дотримання Міжнародного кодексу з управління безпекою, МКУБ, *International Safety Management Code*). Для судновласників і фрахтувальників тип договору фрахтування визначає, крім іншого, вплив кожного учасника на вибір палива та, відповідно, технічний і експлуатаційний контроль балансу відповідності вимогам *FuelEU* до кінця періоду чартеру. Перевірені дані про викиди стають життєво важливим елементом не тільки для відповідності, але й для підтримки операційної та комерційної цілісності в морському ланцюжку створення вартості та взагалі світового судноплавства [5].

IMO також продовжує розробляти нормативні заходи, спрямовані на скорочення викидів парникових газів від міжнародного судноплавства, у розвиток оновленої Стратегії щодо викидів ПГ (2023 *IMO GHG Strategy*). У 2025 році на надзвичайній сесії Комітету з морського середовища (MEPC) було погоджено загальну структуру так званого *IMO Net-Zero Framework* для внесення відповідних поправок до Додатка VI *MARPOL*, однак їхнє остаточне ухвалення відкладено, а переговори продовжуються з орієнтиром на прийняття не раніше кінця 2026 року. У разі запровадження глобального паливного стандарту або ринкового механізму IMO Європейський Союз, згідно з оголошеними намірами та переглядовими положеннями в *EU ETS* і *FuelEU Maritime*, має переглянути власні режими регулювання, щоб мінімізувати дублювання вимог та подвійне навантаження на судновласників.

Висновки. Для обраного судна на перших двох етапах скорочення викидів ПГ в межах ЄС / ЄЕЗ норми викидів виконуються, що не призводить до запровадження штрафних санкцій. Але, вже на третьому етапі зменшити викиди до нормативних значень без впровадження спеціальних технологій неможливо (у даному випадку розглянутий технологічний варіант використання додатково сумісного палива біо-*MGO*, але можливим є додавання будь-якого сумісного екологічного альтернативного палива). Порівняння загальної вартості можливих стратегій судновласника показує різницю в 1,35 ... 1,83 рази на користь стратегій енергоефективності та використання альтернативних джерел енергії проти стратегії «не робити нічого».

Крім того, за результатами опрацювання чинних вимог отримано підтвердження того, що запропонований у даному дослідженні алгоритм прогнозування однаково успішно може бути застосованим для усіх типів транспортних суден, які мають тоннаж понад 5000 GT та працюють з заходами в межі ЄС / ЄЕЗ.

Наявні фінансові можливості та наслідки різних технічних рішень для подальшої розрахункової експлуатації судна, а також можливості гнучкого підходу до застосування тих чи інших спеціальних технологій, зобов'язують судновласника реально оцінювати свої фрахтові зобов'язання, діючи на момент прийняття рішення привілеї, а також те, як вони можуть вплинути у подальшому на можливі комерційні угоди та конвенційні регламентні угоди щодо відповідності. Якщо такі умови не передбачені у контрактах, усі витрати лягають на судновласника, або оператора судна. Для судновласників (операторів судна) попередній фінансово-аналітичний аналіз можливих варіантів застосування спеціальної технології скорочення викидів ПГ визначає вирішальний вплив на технічний та експлуатаційний контроль балансу відповідності вимогам *FuelEU* до кінця періоду чартеру або розрахункового терміну експлуатації. Подібний аналіз стає життєво важливим елементом не тільки для відповідності, але й для підтримки операційної та комерційної цілісності взагалі світового судноплавства.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Суворов П. С., Тарасенко Т. В., Залож В. І. Деякі питання оцінки енергоефективності суден в умовах енергетичного переходу у внутрішньому судноплавстві // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2023. – Вип. 2(2023). – С. 37–45. – DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2023.2.05>.
2. FuelEU Maritime – Requirements, compliance strategies, and commercial impacts [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dnv.com/maritime/publications/fueleu-maritime-white-paper-download/> (дата звернення: 26.04.2026).
3. Ship&Bunker [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam#MGO> (дата звернення: 26.04.2026).

4. Greenhouse Gas Emissions Calculator. United Nations Framework Convention on Climate Change [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://unfccc.int/documents/271269> (дата звернення: 26.04.2026).

5. Reducing emissions from the shipping sector [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector_en (дата звернення: 26.04.2026).

Abstract. New regulations issued by the European Union (EU) and the International Maritime Organization (IMO) concerning greenhouse gas (GHG) emissions are expected to have a profound impact on the shipping industry, resulting in significant financial implications for shipowners seeking to comply with these requirements. These regulations necessitate the consideration of various compliance strategies, including the potential adoption of dual-fuel technologies, to reduce emissions in line with legal standards. This study presents a scenario-based analysis of the transition to eco-navigation using the example of a medium-sized bulk carrier, without undertaking major vessel retrofitting, but incorporating the use of compatible biofuels. Such an approach can be extended to other types of cargo vessels, providing a generalizable framework for evaluating compliance strategies. In the early stages following the implementation of the new regulatory limits, the vessel's GHG emissions remain within the prescribed thresholds, with penalties only anticipated during the third stage of emissions reductions. The analysis demonstrates that for shipowners operating multiple vessels of the same type, scenario-based planning can offer valuable insights into optimizing operational costs and assessing the potential benefits of pooling compliance efforts. This, in turn, enhances the economic feasibility of introducing compatible alternative fuels while ensuring adherence to regulatory requirements.

By providing a structured assessment of emissions trajectories and compliance pathways, this study emphasizes the importance of strategic planning in the context of evolving regulatory frameworks. The findings underscore that careful consideration of vessel-specific operational parameters, fuel choices, and multi-vessel management strategies can mitigate financial risks and facilitate the cost-effective adoption of environmentally friendly technologies, thereby supporting the broader goal of sustainable shipping.