

УДК 656.61:504.05:662.767

Толобасв Георгій Геннадійович

magistr, судовий оператор, Stolt-Nielsen

Tolobaiev Georgii

Master, Vessel Operator, Stolt-Nielsen

ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ: АНАЛІЗ РЕАЛІЗОВАНИХ І ПЕРСПЕКТИВНИХ ЗАХОДІВ ЗІ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ CO₂

Анотація. Інтенсивне посилення міжнародних екологічних вимог і політики переходу до низьковуглецевої економіки спричинило безпрецедентний тиск на світове судноплавство, що актуалізує потребу в глибокому перегляді паливно-енергетичних підходів. Декарбонізація морського транспорту вже не обмежується модернізацією окремих судових систем, а охоплює комплексне впровадження альтернативних палив, технологій уловлювання викидів та операційних рішень, здатних забезпечити суттєве скорочення інтенсивності CO₂. Метою дослідження є аналіз реалізованих та інноваційних підходів до скорочення викидів CO₂ у морському транспорті з акцентом на порівняльних характеристиках альтернативних видів палива, технологіях енергоефективності та шляхах адаптації українського судноплавства до нової екологічної парадигми. Методологічну основу становлять системний і порівняльний підходи, метод аналізу життєвого циклу палив, структурно-функціональний розбір інфраструктурних рішень та критична інтерпретація сучасних наукових джерел. У результаті дослідження встановлено, що застосування альтернативних палив формується як багатовекторний процес, в якому СПГ відіграє роль перехідного енергоносія, метанол демонструє високу

гнучкість експлуатації за умови доступності «зелених» версій, аміак забезпечує потенційно мінімальні прямі викиди, тоді як біопаливо створює найреалістичнішу нішу для України завдяки можливості використання в наявних двигунах. Проаналізовано ефективність технічних рішень від модернізації силових установок до післяспалювального уловлювання CO₂, а також операційні інструменти, що забезпечують негайне зниження емісій через оптимізацію режимів руху. Сформовано перспективні напрями для України, серед яких розвиток біопаливних кластерів, створення бункерувальної інфраструктури для альтернативних палив, інтеграція до «зелених» коридорів ЄС та адаптація нормативної бази відповідно до вимог ІМО та європейського законодавства. У висновках підкреслено, що декарбонізація судноплавства є довгостроковим процесом, що поєднує технологічні інновації, інституційну підтримку та модернізацію інфраструктури. Результати дослідження можуть бути використані у стратегічному плануванні, формуванні державної політики, розробленні галузевих дорожніх карт та ухваленні інвестиційних рішень судноплавними компаніями. Перспективи подальших досліджень пов'язані з поглибленим моделюванням впливу «зелених» версій палив, оцінюванням надійності двигунів на аміаку та водні, а також із розробленням інструментів цифрового моніторингу викидів у реальному часі.

Ключові слова: низьковуглецеві технології, альтернативні суднові палива, енергоефективність флоту, уловлювання CO₂, морська екологічна політика, зелена логістика.

Постановка проблеми. Проблематика декарбонізації морського транспорту загострилася в умовах посилення міжнародних регуляторних вимог, що закріплені у Стратегії Міжнародної морської організації (International Maritime Organization, IMO) щодо скорочення викидів парникових газів. Оновлений документ встановлює амбітні цілі з

досягнення нульового рівня викидів до середини століття, що потребує кардинального перегляду технологічних підходів і паливних систем на світовому флоті [1; 2]. Однак переважна частина торговельних суден усе ще експлуатує дизельні двигуни на традиційних нафтопродуктах, що створює потужний технологічний і фінансовий бар'єр для переходу до низьковуглецевих рішень.

Сучасні дослідження підтверджують, що жоден альтернативний вид палива (біопаливо, метанол, водень чи електропаливо) не може виконувати роль універсального рішення для всіх класів суден і типів рейсів. Кожне з них має специфічні переваги й обмеження, пов'язані з енергетичною щільністю, безпекою зберігання, вимогами до двигунів і рівнем супутніх викидів. Аналіз життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) демонструє різні екологічні профілі навіть у межах одного виду альтернативного палива, що підтверджено в оцінюванні великих танкерних суден Very Large Crude Carrier (VLCC) [3; 4]. Це свідчить про необхідність індивідуалізованого вибору енергоносіїв для різних експлуатаційних умов.

Економічна складова також залишається ключовим стримувальним чинником. За результатами міжнародних досліджень, більшість альтернативних видів палива суттєво поступається традиційним за вартістю життєвого циклу, особливо в умовах високої капіталомісткості модернізації флоту та нестабільності регуляторної політики [5]. Дорожні карти розвитку екологічного судноплавства, розроблені науковими та інженерними центрами, підкреслюють, що без масштабної участі державних інституцій і приватних інвесторів розгортання інфраструктури альтернативного палива буде повільним та фрагментарним [6].

Таким чином, проблема декарбонізації морського транспорту набуває комплексного характеру. Вона поєднує технологічні, екологічні, економічні та інституційні аспекти, що взаємно впливають на можливість скорочення викидів CO₂ на суднах. Потреба у всебічному аналізі реалізованих

технологій, перспективних паливних рішень та умов їх практичного застосування зумовлює актуальність дослідження для наукової спільноти та практиків морської галузі, які мають адаптувати флот до нової низьковуглецевої парадигми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях декарбонізації морського транспорту простежується кілька взаємопов'язаних наукових напрямів, що відображають глобальний перехід галузі до альтернативних палив і скорочення викидів CO₂. Значну увагу приділяють регуляторним передумовам екологічної трансформації. У роботі Д. Решеткова та Н. Павлової окреслено ключові міжнародні ініціативи та наголошено, що саме жорсткі нормативні вимоги Міжнародної морської організації (ІМО) запускають системні зміни в паливній політиці судноплавства [7]. Автори роблять обґрунтовані висновки, втім їхній аналіз недостатньо торкається економічних викликів, що стримують практичну реалізацію запропонованих заходів. Доповненням до цього є дослідження А. Гжеляковського (A. Grzelakowski), Й. Гердзика (J. Herdzik) та С. Скіби (S. Skiba), де стратегія декарбонізації розглянута як чинник перебудови глобальних логістичних ланцюгів, хоча регіональні особливості впровадження майже не висвітлені [8].

Велика група досліджень присвячена альтернативним видам палива. Так, Т. Железна та С. Драгнєв наголошують на тому, що ефективність біопалив залежить від технологічних особливостей їх виробництва та створення стійких логістичних ланцюгів постачання [9]. У роботі О. Мельника та ін. систематизовано технічні характеристики аміаку, метанолу та водню, а також підкреслено складність їх інтеграції у наявні судові енергетичні системи [10]. Зазначена позиція є коректною, хоча автори майже не розглядають ризики експлуатації водню, що важливо в умовах морського середовища.

Актуальною складовою сучасної наукової дискусії став аналіз життєвого циклу палив LCA. Результати дослідження Дж. Ампах (J. Ampha) та ін. підтверджують, що результати LCA істотно залежать від методики розрахунку непрямих викидів, ускладнюючм порівняння між різними типами енергоносіїв [11]. Схожі висновки подано у дослідженні Дж. Хуанг (J. Huang) та ін., які показали, що аміак має найнижчі прямі викиди на прикладі VLCC, хоча його виробництво генерує значні непрямі витрати енергії [3].

Окремим напрямом досліджень є очисні технології та уловлювання викидів. Ю. Дзянг (Y. Jiang) та ін. порівняли системи післяспалювального уловлювання CO₂ та показали переваги водозбіднелих розчинників над традиційними [12]. Однак науковці не врахували складність застосування таких систем на рухомих суднах, де важливими є масогабаритні й енергетичні обмеження. Натомість, Т. Занніс (T. Zannis) та ін. розглянули системи обробки вихлопних газів для зменшення викидів SO_x і NO_x, наголосивши, що вони мають опосередкований характер впливу на скорочення викидів CO₂ і виконують переважно підтримувальну функцію [13].

Питання інфраструктури та інноваційних підходів до переходу на нові палива досліджували М. Гроссо (M. Grosso) та ін., які відзначили нерівномірність інвестицій у різні паливні технології і повільне розгортання інфраструктури для електропалив [14]. У дослідженні С. Франц (S. Franz) та ін. показано, що відсутність портових систем для зберігання аміаку та синтетичних палив є ключовим стримувальним чинником в Європі [6]. Таким чином, наявність технологій ще не гарантує їх упровадження без відповідних організаційних і логістичних змін.

Окремі аспекти модернізації суднових енергетичних систем висвітлено в роботі М. Пушкара (M. Puškár) та ін., де продемонстровано, що оптимізація паливних сумішей допоміжних дизельних двигунів може

зменшити рівень викидів, хоча такі рішення мають обмежений вплив на загальний вуглецевий баланс судна [15]. Цей напрям важливий, оскільки допоміжні двигуни генерують значну частку викидів під час портових і маневрових операцій. Також дослідження М. Саадельдіна (M. Saadeldin) та ін. поглиблює розуміння процесів згоряння на альтернативних паливах завдяки моделям, що дозволяють оцінити екологічні наслідки роботи морських енергетичних систем [16].

Узагальнення результатів свідчить про суттєвий прогрес у дослідженнях альтернативних палив, систем уловлювання, інфраструктурних рішень і регуляторної політики, однак у літературі залишаються помітні прогалини. Недостатньо вивченими залишаються питання надійності суднових двигунів при роботі на аміаку й електропаливах, вплив морських умов на ефективність систем уловлювання CO₂, економічні моделі переходу для різних регіонів та інтеграція цифрових екологічних систем у паливно-енергетичні процеси. Ці наукові прогалини визначають напрями подальших досліджень і підкреслюють актуальність комплексного аналізу низьковуглецевих технологій у морському секторі.

Формулювання мети дослідження. Метою статті є дослідження реалізованих і перспективних підходів до декарбонізації морського транспорту з акцентом на альтернативних видах палива та технологіях скорочення викидів CO₂ у судновій енергетиці. Для досягнення поставленої мети сформульовано такі завдання дослідження:

1. Дослідити сучасні тенденції використання альтернативних палив у морському транспорті та їхній вплив на викиди CO₂.
2. Проаналізувати ефективність наявних технологій декарбонізації, включно з оцінюванням життєвого циклу палив, уловлюванням та очищенням викидів, а також інфраструктурними передумовами їх впровадження.

3. Виявити перспективні напрями підвищення екологічної стійкості судноплавства та сформувані рекомендації щодо оптимізації переходу до низьковуглецевих паливних рішень у морській галузі.

Викладення основного матеріалу дослідження. Без активних декарбонізаційних заходів частка судноплавства в глобальних викидах CO₂ може зрости до 17% уже до 2050 року [10, с. 215–216]. Це зумовило посилення інтересу до альтернативних видів палива як ключового напрямку скорочення емісії парникових газів у морському транспорті. Альтернативні палива охоплюють скраплений природний газ (СПГ), біопаливо різних видів, метанол, аміак, водень та інші енергоносії із низьким або нульовим вмістом вуглецю. Дослідження підтверджують, що універсального рішення, здатного повністю замінити традиційне суднове паливо у всіх сегментах флоту, наразі не існує, а кожен альтернативний енергоносіє має специфічні переваги й обмеження щодо енергетичної щільності, вимог безпеки, сумісності з двигунами та супутніх викидів [3; 11].

Найбільшу увагу серед низьковуглецевих палив сьогодні привертають СПГ, метанол, аміак, біопаливо та водень. СПГ вже зайняв помітну нішу як перехідне паливо завдяки нижчому вмісту вуглецю порівняно з мазутом і наявній інфраструктурі для зрідження та бункерування [3; 17]. Проте СПГ залишається викопним паливом, яке все ще генерує значні обсяги CO₂ при повному життєвому циклі, тому розглядається переважно як тимчасове рішення.

Метанол – альтернативне паливо, що може вироблятися з біомаси або за допомогою відновлюваної електроенергії. Зелені варіанти метанолу (біометанол або е-метанол) потенційно здатні забезпечити нейтральний баланс CO₂, до того ж метанол у рідкому стані при стандартних умовах значно спрощує його зберігання і подачу на судах [10, с. 215–217]. Водночас він має нижчу енергетичну щільність, а переобладнання двигунів потребує врахування корозійних впливів цього пального.

Аміак вирізняється тим, що при спаленні не продукує прямого CO₂. Наприклад, за результатами моделювання для танкера типу VLCC аміак має найнижчі прямі вуглецеві викиди серед інших альтернативних палив [3]. Однак його виробництво пов'язане зі значними непрямими витратами енергії та емісіями, оскільки використання аміаку, синтезованого з викопних джерел, не дає жодного скорочення сумарних парникових викидів порівняно з традиційним паливом. Ефективність «зеленого» аміаку суттєво залежить від використання відновлюваної енергії у процесі його синтезу, а також від утилізації оксидів азоту (N₂O), що утворюються в судновому двигуні.

Біопаливо (біодизель, гідроочищена рослинна олія, біогаз тощо) розглядається як привабливий варіант, оскільки може використовуватися в існуючих двигунах із мінімальними модифікаціями. Дослідження відзначають, що застосування біопалив здатне прямо зменшити сумарні викиди CO₂ (за рахунок біогенного походження вуглецю) та практично повністю усунути викиди сірки. Водночас ефективність біопального проєкту багато в чому визначається технологією його виробництва та наявністю стійких логістичних ланцюгів постачання сировини [9, с. 76–79]. Зокрема, біопаливо з відходів має значно кращий вуглецевий профіль, ніж паливо з продовольчої сировини, але обмежені обсяги доступної біомаси та вища собівартість стримують масштабне впровадження [5].

Водень розглядається як стратегічне безвуглецеве пальне майбутнього (передусім у паливних елементах), оскільки при його використанні утворюється лише вода. Перевагами водню є нульові викиди при споживанні та теоретично необмежена ресурсна база за рахунок електролізу води [15]. Однак низька об'ємна щільність енергії водню ставить складні інженерні задачі щодо його зберігання на судах (потреба в криогенних резервуарах або високому тиску), а експлуатація потребує вирішення питань безпеки через вибухонебезпечність цього газу. Отже,

кожне з альтернативних палив має свої ніші ефективного застосування та пов'язані ризики, що визначає мультивекторність тенденцій декарбонізації флоту.

Згідно з даними Clarkson Research, станом на кінець 2022 року лише близько 4,8% світового флоту (за дедвейтом) було обладнано для використання альтернативних палив, тоді як у портфелі суднобудівних замовлень цей показник досягав 43,8% (за тоннажем) [3]. Це свідчить, що світове судноплавство вже закладає технологічний фундамент для майбутнього низьковуглецевого розвитку. У таблиці 1 наведено ключові показники поширення альтернативних палив у галузі.

Таблиця 1

**Поширення альтернативних палив у морському транспорті
(станом на 2022 рік)**

Показник	Значення
Частка світового флоту, що може використовувати альтернативні палива	4,8% (за дедвейтом)
Частка тоннажу суден у замовленні, здатного працювати на альтернативних паливах	43,8%
Замовлення на судна під СПГ	781 од.
Замовлення на судна під метанол	42 од.
Замовлення на судна «аміак-готові» (ammonia-ready), спроектовані з урахуванням можливості переходу на аміак	130 од.

Джерело: узагальнено автором на основі даних [2; 3; 17]

Загалом сучасні тенденції свідчать про перехідний період, коли традиційні нафтові палива співіснують із дедалі ширшим спектром альтернатив. Ефект для викидів CO₂ при цьому залежить від обраного палива та умов його отримання. Найбільший потенціал зниження парникових викидів досягається за комплексного підходу – використання «зелених» версій палив (вироблених із поновлюваних джерел) у поєднанні з технологіями контролю викидів на борту. У той же час економічні чинники (ціна життєвого циклу палива, затрати на переобладнання суден) стримують масову відмову від викопного пального [2; 5]. Саме тому світове

судноплавство наразі експериментує з різними паливними рішеннями, поступово нарощуючи парк екологічно дружніх суден і створюючи передумови для подальшої декарбонізації.

Глобальна стратегія декарбонізації морського транспорту формується на перетині технічних інновацій, регуляторних вимог та організаційних рішень. ІМО задала високі орієнтири, визначивши курс на нульові викиди до середини століття, що створило нормативний фундамент для трансформації флоту. Європейський Союз, своєю чергою, запровадив регуляторні інструменти (FuelEU Maritime, EU ETS, поетапне скорочення інтенсивності викидів тощо), які стали економічним стимулом модернізації галузі. Жорсткі стандарти EEDI/EECI та СІІ змушують судноплавні компанії переглядати технічні рішення та паливні стратегії, зменшуючи роль традиційного мазуту і прискорюючи пошук низьковуглецевих альтернатив [7; 17].

Технологічні заходи нині охоплюють модернізацію силових установок, інтеграцію альтернативних палив і систем уловлювання викидів. Установка скруберів для SO_x і NO_x отримала широке поширення на великотоннажних судах, хоча їхній вплив на CO_2 є опосередкованим [13]. Значно перспективнішим є післяспалювальне уловлювання CO_2 , оскільки результати техніко-економічного аналізу демонструють вищу ефективність водозбіднених розчинників порівняно з традиційними амінами [12]. Однак питання інтеграції таких систем у суднові енергетичні комплекси залишаються відкритими через їх масогабаритні й енергетичні обмеження.

Організаційні заходи стають ключовим інструментом оперативного скорочення викидів без масштабної заміни флоту. «Slow steaming», цифрова маршрутизація, оптимізація швидкісних режимів і підхід «just-in-time» мінімізують зайве спалення палива під час рейсів та портових операцій. Концепція «зелених коридорів», підтримана низкою країн, має на меті створення мережі маршрутів, забезпечених інфраструктурою для

екологічних палив, що дозволяє концентрувати інновації та формувати попит на низьковуглецеві технології [17].

Попри наявність низки рішень, темпи декарбонізації обмежують інфраструктурні та ринкові бар'єри. Саме нестача виробництва «зелених» палив і повільний розвиток бункерувальних потужностей можуть стати головними перешкодами переходу. У Європі відсутність портових систем для зберігання аміаку й електропалив уже стримує реалізацію низки ініціатив. Це вимагає синхронізації державної політики, інвестицій приватного сектору та інноваційних рішень у морських енергетичних системах. Узагальнення відповідних заходів представлено у таблиці 2.

Таблиця 2

Основні реалізовані заходи з декарбонізації морського транспорту

Заходи	Характеристика та вплив	Категорія
Перехід на альтернативні види палива	СПГ, метанол, біопаливо, аміак; зниження CO ₂ залежить від походження палива й умов його виробництва	Технологічна
Підвищення енергоефективності суден	Модернізація двигунів, оптимізація корпусу, рекуперація тепла; зменшення витрат палива та CO ₂	Технологічна
Очищення й уловлювання викидів	Скрубери SO _x /NO _x ; дослідні системи уловлювання CO ₂ на борту	Технологічна
Оптимізація експлуатації	«Slow steaming», маршрутизація, цифровий моніторинг споживання; зменшення викидів без модернізації флоту	Організаційна
Берегове електропостачання	Підключення суден до мережі порту, усунення локальних викидів під час стоянки	Організаційна / технічна
Міжнародні стандарти та квоти	IMO EEDI/EEEXI, CII; EU ETS та FuelEU Maritime – регуляторний стимул інвестицій у «зелені» рішення	Регуляторна

Джерело: узагальнено автором на основі даних [2; 6; 7; 12; 13; 15; 17]

Перспективні напрями декарбонізації українського судноплавства формуються під впливом глобальних тенденцій і зростаючих вимог ЄС до екологічності морських перевезень. У контексті післявоєнного відновлення впровадження низьковуглецевих технологій розглядається не лише як екологічний пріоритет, а як інструмент підвищення

конкурентоспроможності портів, залучення інвестицій та інтеграції України до європейських транспортних мереж. Альтернативні палива можуть суттєво зменшити викиди CO₂, проте вибір оптимальних рішень залежить від національних ресурсів, вартості паливного циклу та готовності суднових енергетичних систем до переходу [9, с. 82–85; 17].

Одним із найбільш перспективних напрямів для українського флоту є масштабування використання біопалив, насамперед біодизеля, гідроочищеної рослинної олії і біометану, які вже апробовані в міжнародній практиці та можуть застосовуватися в існуючих двигунах без суттєвих модернізацій. Водночас інтеграція України до мережі «зелених» коридорів ЄС потребує створення відповідної інфраструктури: бункерувальних потужностей для СПГ, метанолу та інших альтернативних палив, а також розвиток берегового електроживлення в ключових портах. Подібні інфраструктурні рішення є критично важливими, оскільки саме їхня відсутність сьогодні обмежує можливість обслуговувати судна, що працюють на нових видах палива.

Не менш значущими є інституційні та регуляторні кроки, як-от адаптація національного законодавства до правил ІМО та ЄС, створення Національного плану декарбонізації водного транспорту, запровадження стимулів для судновласників і поступова підготовка до участі в системах торгівлі викидами. Паралельно ключову роль відіграє цифровізація, яка дозволяє оптимізувати швидкість і маршрути, зменшувати витрати палива та забезпечувати прозорий моніторинг екологічних показників. Сукупність цих рішень формує цілісну основу для довгострокового переходу до низьковуглецевого українського морського транспорту.

Узагальнення перспективних підходів демонструє, що ефективна декарбонізація українського морського транспорту можлива лише за умов поєднання технологічних інновацій, модернізації інфраструктури, міжнародної співпраці та регуляторної підтримки. У таблиці 3

систематизовано ключові напрями, які відповідають стратегічним пріоритетам галузі і ґрунтуються на положеннях сучасних наукових досліджень та аналітичних джерел.

Таблиця 3

Перспективні заходи з декарбонізації українського морського транспорту

Підхід / захід	Зміст і очікуваний ефект
Пріоритетне впровадження біопалив	Налагодження виробництва біометану, біодизеля та гідроочищеної рослинної олії; скорочення життєвих CO ₂ -викидів і зменшення залежності від нафтопродуктів
Інфраструктура для альтернативних палив	Створення СПГ-терміналів і бункерувальних пунктів для СПГ, метанолу та водню; інтеграція українських портів у глобальні «зелені» коридори
Створення «зелених» коридорів	Участь у міжнародних ініціативах Чорноморського регіону; отримання доступу до інвестицій ЄС і поширення найкращих екотехнологій
Гармонізація регуляторної бази з ЄС	Розроблення Національного плану декарбонізації, імплементація FuelEU Maritime, EU ETS, оновлення вимог ІМО; стимулювання інвестицій у «зелені» технології
Цифровізація та інновації для енергоефективності	Упровадження систем оптимізації швидкості руху, маршрутизації, моніторингу викидів; підвищення операційної ефективності та зниження витрат палива
Оновлення флоту за «зеленими» критеріями	Будівництво після війни нових суден під альтернативні палива; списання найстаріших енергоємних одиниць; підготовка до флоту з нульовими викидами

Джерело: власна розробка автора

Результати аналізу свідчать, що перспективні напрями декарбонізації українського морського сектору мають багатовекторний характер та охоплюють паливні, інфраструктурні, організаційні і регуляторні рішення. Найбільш реалістичним у середньостроковій перспективі є розвиток біопалив і цифрових рішень для енергоефективності, тоді як водень та аміак формують довгострокову траєкторію технологічного переходу. Комплексне впровадження зазначених заходів у поєднанні з адаптацією нормативної бази та міжнародною співпрацею створює передумови для формування

низьковуглецевої моделі українського судноплавства, здатної відповідати сучасним екологічним стандартам ЄС та ІМО.

Висновки. Розвиток світового судноплавства переходить у фазу глибокої трансформації, оскільки посилення глобальних екологічних зобов'язань та інтеграція нових паливних технологій стають визначальними чинниками конкурентоздатності галузі. У таких умовах питання скорочення викидів CO₂ виходить за межі суто технологічної проблеми та перетворюється на стратегічний орієнтир для держав і судноплавних компаній, що прагнуть відповідати стандартам ІМО та вимогам європейських екологічних політик. Зростаюча роль альтернативних палив та інноваційних систем енергоефективності підтверджує, що судноплавство вступає в перехідний період, де гнучкість у виборі енергоносіїв і здатність до модернізації визначатимуть успіх адаптації до низьковуглецевої економіки.

У ході дослідження встановлено, що застосування альтернативних палив уже сьогодні формує нову архітектуру глобального флоту. Дослідження особливостей використання СПГ, метанолу, аміаку, водню та різних видів біопалива продемонструвало суттєві відмінності в їхніх екологічних та експлуатаційних характеристиках. Проаналізовано ефективність наявних технологій декарбонізації, включно з системами уловлювання CO₂ та заходами енергоефективності, які довели свою здатність зменшувати сумарні викиди за умови правильного поєднання технічних та операційних рішень. Сформовано перспективні напрями для українського флоту: розвиток біопаливних програм, створення інфраструктури для екологічних енергоносіїв, розбудова «зелених» коридорів та адаптація нормативної бази до європейських вимог. Ці висновки відображають логіку виконаних аналітичних процедур і підкреслюють взаємозалежність між технологічними можливостями, інфраструктурою та стратегічними національними цілями.

Отримані результати мають як теоретичну, так і практичну цінність. З наукової точки зору сформовано системний підхід до оцінювання альтернативних палив і механізмів зниження CO₂-викидів, що дозволяє узгоджувати різні технічні та економічні параметри при моделюванні сценаріїв розвитку галузі. З практичного погляду висновки можуть бути використані під час розроблення державних стратегій декарбонізації, ухвалення рішень судноплавними компаніями щодо модернізації флоту, а також при плануванні інфраструктурних проєктів у морських портах, зокрема в межах євроінтеграційної політики України. Визначені підходи створюють основу для переходу до низьковуглецевих технологій, здатних забезпечити зниження паливної залежності та підвищити екологічну сталість морського сектора.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на глибше моделювання викидів при використанні «зелених» версій палива, оцінювання довгострокової надійності двигунів на аміаку та водні, аналіз економічних механізмів підтримки судноплавних компаній у перехідний період та інтеграцію цифрових систем моніторингу викидів в єдині екологічні платформи. Важливим також стане дослідження можливостей залучення України до міжнародних консорціумів із розвитку нових паливних технологій та інфраструктури. Комплексність цих напрямів вказує на необхідність поєднання інженерних, економічних і регуляторних рішень, що забезпечить стійку трансформацію морського транспорту в умовах глобального переходу до низьковуглецевих моделей розвитку.

Література

1. Ярова Н., Воркунова О. Вплив цифрових технологій на екологічну стійкість підприємств морського транспорту. *Економіка та суспільство*. 2024. № 66. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-66-117>

2. 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. International Maritime Organization, 2023. URL: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/2023-imo-strategy-on-reduction-of-ghg-emissions-from-ships.aspx> (дата звернення: 12.12.2024).

3. Huang J., Fan H., Xu X., Liu Z. Life cycle greenhouse gas emission assessment for using alternative marine fuels: A very large crude carrier (VLCC) case study. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10. No. 12. Article 1969. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10121969>

4. Saadeldin M., Elgohary M., Abdelnaby M., Shouman M. Biofuels and electrofuels as alternative green fuels for marine applications: A review. *Marine Technology Society Journal*. 2023. Vol. 57. No. 3. P. 51–68. DOI: <https://doi.org/10.4031/MTSJ.57.3.2>

5. Solakivi T., Paimander A., Ojala L. Cost competitiveness of alternative maritime fuels in the new regulatory framework. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2022. Vol. 113. Article 103500. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103500>

6. Franz S., Champion N., Shapiro-Bengtzen S., Münster M. Roadmap for sustainable fueling options in the maritime sector. *Proceedings of the 7th World Maritime Technology Conference 2022 (Copenhagen, Denmark)*. 2022. URL: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/274844369/ROADMAP_FOR_SUSTAINABLE_FUELING_OPTIONS_IN_THE_MARITIME_SECTOR.pdf (дата звернення: 12.12.2024).

7. Решетков Д., Павлова Н. Глобальні ініціативи щодо декарбонізації морського транспорту. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33 (72). № 5. С. 312–317. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/48>

8. Grzelakowski A., Herdzik J., Skiba S. Maritime shipping decarbonization: Roadmap to meet zero-emission target in shipping as a link in

the global supply chains. *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 17. Article 6150. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15176150>

9. Желєзна Т., Драгнєв С. Аналіз перспектив використання біопалив на морському транспорті. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2024. Т. 3. № 6. С. 75–87. DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240306.07>

10. Технології та перспективи альтернативних видів палива для морських суден / О. Мельник та ін. *Грааль науки*. 2023. № 25. С. 215–220. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.17.03.2023.034>

11. Reviewing two decades of cleaner alternative marine fuels: A life cycle perspective / J. Ampah et al. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 320. Article 128871. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128871>

12. Techno-economic comparison of various process configurations for post-combustion carbon capture using a single-component water-lean solvent / Y. Jiang et al. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2021. Vol. 106. Article 103279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103279>

13. Marine exhaust gas treatment systems for compliance with the IMO 2020 Global Sulfur Cap and Tier III NO_x limits: A review / T. Zannis et al. *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 10. Article 3638. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15103638>

14. The role of research and innovation in Europe for the decarbonisation of waterborne transport / M. Grosso et al. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. No. 18. Article 10447. DOI: <https://doi.org/10.3390/su131810447>

15. Puškár M., Tarbajovský P., Lavčák M., Šoltésová M. Marine ancillary diesel engine emissions reduction using advanced fuels. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10. No. 12. Article 1895. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10121895>

16. Saadeldin M., Elgohary M., Abdelnaby M., Shouman M. Advanced simulation and environmental impact assessment of combustion in maritime

energy systems. *Marine Technology Society Journal*. 2024. Vol. 58. No. 3. P. 36–55. DOI: <https://doi.org/10.4031/MTSJ.58.3.3>

17. Маслов Ю. Питання зеленого курсу та декарбонізації України у контексті відновлення транспортної інфраструктури. *LB.ua*. URL: https://lb.ua/blog/yurii_maslov/615077_pitannya_zelenogo_kursu.html (дата звернення: 12.12.2024).