

DOI: 10.31653/smf52.2026.45-60

дата першого надходження: 14.01.26  
дата прийняття статті до друку після  
рецензування: 21.02.26  
дата публікації: 05.05.26

Парменова Д.Г.<sup>1</sup>, Кулешов І.М.<sup>2</sup><sup>1</sup>ORCID 0000-0001-7794-8586, <sup>2</sup>ORCID 0009-0009-0169-4669

Національний університет «Одеська морська академія»

## **ЦИФРОВІ ЗАСОБИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ**

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Декарбонізація морського транспорту на сьогодні перетворилася на системну управлінську, технічну та економічну проблему. Після ухвалення Міжнародною морською організацією (ІМО) Стратегії 2023 року щодо скорочення викидів парникових газів із суден вимоги до екологічності суден стали значно жорсткішими: визначено орієнтир досягнення нульового балансу викидів міжнародного судноплавства приблизно до 2050 року, збережено ціль зниження вуглецевої інтенсивності щонайменше на 40 % до 2030 року відносно 2008 року та встановлено мету щодо забезпечення до 2030 року щонайменше 5 % загальногоспоживання міжнародного судноплавства за рахунок технологій, палив та джерел енергії з нульовими або майже нульовими викидами парникових газів, із орієнтиром на досягнення 10 % [1]. У таких умовах судноплавні компанії, порти, класифікаційні товариства, розробники суднових енергетичних установок і органи державного та міжнародного регулювання стикаються не лише з потребою впровадження нових палив та енергетичних рішень, а й з необхідністю якісно нового рівня цифрового управління судновими операціями, ланцюгами постачання, технічним станом обладнання та верифікацією викидів.

У цьому контексті цифровізація не є лише допоміжним елементом. Вона стає інфраструктурою декарбонізації, оскільки саме цифрові дані дозволяють перетворити загальні екологічні цілі на конкретні експлуатаційні рішення: вибір швидкості, маршруту, режиму енергоспоживання, часу прибуття до порту, параметрів технічного обслуговування та поєднання енергетичних ресурсів, що використовуються на судні. У сучасних дослідженнях зазначається, що цифровізація здатна підтримати декарбонізацію як у судноплаванні, так і в

портах та суміжних логістичних системах [2]. Водночас огляд досліджень з цифрової трансформації морського транспорту показує, що її результативність визначається не лише наявністю технологій, а й стандартизацією даних, міжорганізаційною координацією та готовністю персоналу працювати з новими інструментами [3].

**Постановка проблеми.** Проблема полягає в тому, що сучасне судноплавство перебуває під подвійним тиском. З одного боку, зростають міжнародні та регіональні вимоги до скорочення викидів. Міжнародна морська організація (ІМО) поєднала обов'язкові технічні та експлуатаційні механізми, зокрема визначення індексу енергоефективності існуючого судна (ЕЕХІ) та експлуатаційного показника вуглецевої інтенсивності судна (СІІ), запровадження Плану управління енергоефективністю судна (SEEMP) та системи збору даних про споживання палива. Відповідно до чинних підходів SEEMP має включати три частини: План управління, спрямований на підвищення енергоефективності, План збору даних щодо витрати палива та План щодо експлуатаційної вуглецевої місткості судна [4, 5]. Система збору даних ІМО про споживання суднового палива (IMO Data Collection System, IMO DCS) вимагає від суден валовою місткістю 5000 рег. тонн і більше фіксувати та подавати верифіковані дані про витрати палива, а держави прапора – передавати їх до бази даних ІМО у визначені строки [6, 7]. З іншого боку, у Європейському Союзі (ЄС) з 1 січня 2024 року морські перевезення включені до Системи торгівлі дозволами на викиди Європейського Союзу (European Union Emissions Trading System, EU ETS), а з 2025 року регламент ЄС щодо використання відновлюваних і низьковуглецевих палив у морському транспорті (FuelEU Maritime) запроваджує поетапне скорочення викидів парникових газів з суден від 2 % у 2025 році до 80 % у 2050 році та вимагає в окремих випадках підключення до берегового електропостачання під час стоянки [8, 9].

За цих умов традиційними підходами до управління судновою енергоефективністю є періодичний аналіз рейсу, ручне опрацювання звітів, ізольоване планування маршруту або обслуговування за календарним принципом – виявляються недостатніми. Вони не забезпечують своєчасної реакції на зміну погоди, навантаження, черги в портах, погіршення технічного стану пропульсивного комплексу, зміну нормативних вимог і вартості забезпечення вуглецевої відповідності.

**Постановка завдання.** Завданням дослідження було визначення того, які саме цифрові інструменти реально здатні забезпечити скорочення викидів на морському транспорті, як вони інтегруються з чинними міжнародними нормами та які обмеження супроводжують їх впровадження.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблематика декарбонізації морського транспорту в сучасних наукових дослідженнях дедалі частіше розглядається у взаємозв'язку з цифровою трансформацією судноплавства, портової інфраструктури та логістичних ланцюгів. У фаховій літературі наголошується, що досягнення цілей зі скорочення викидів парникових газів у морській галузі пов'язується не лише з технічною модернізацією суден і впровадженням альтернативних палив, а й із застосуванням цифрових інструментів, здатних поєднувати експлуатаційні, енергетичні, екологічні та регуляторні параметри в єдину систему прийняття рішень [1, 3].

Аналіз наукових праць показує, що одним із найбільш розроблених напрямів є дослідження систем цифрового моніторингу, звітності та аналітики, які забезпечують виконання міжнародних і регіональних вимог щодо енергоефективності та викидів. У центрі уваги таких досліджень перебувають питання збору, передавання, верифікації та інтерпретації експлуатаційних даних судна для забезпечення відповідності вимогам СІІ, SEEMP та DCS. Зокрема, у роботі [10] запропоновано спрощену систему моніторингу для малих і середніх суден, здатну на основі обмеженого набору параметрів формувати достатньо інформативну картину щодо швидкості, потужності, витрати палива, викидів CO<sub>2</sub> та загальної ефективності судна [10]. Поряд із цим у професійних аналітичних матеріалах Інституту морської інженерії, науки і технологій (IMarEST) підкреслюється, що саме дані, отримані в процесі експлуатації, створюють підґрунтя для зниження витрати палива, скорочення викидів та прийняття більш обґрунтованих операційних рішень у сфері декарбонізації [11].

Окремий масив публікацій присвячено цифровій оптимізації рейсу, швидкості та погодної маршрутизації. У цих роботах доводиться, що врахування прогнозованих гідрометеорологічних умов, параметрів навантаження судна та критеріїв безпеки дозволяє зменшувати витрати палива без погіршення експлуатаційної надійності та безпеки судноплавства [12, 13]. Важливо, що сучасні дослідження та аналітичні матеріали розглядають «оптимізацію рейсу» (voyage optimisation) і «погодну маршрутизацію» (weather routing) не як ізо-

льовані навігаційні інструменти, а як частину ширшої системи координації між судном, портом і логістичним ланцюгом. Саме в такому контексті «прибуття точно в строк» (just-in-time arrival) починає тлумачитися не лише як інструмент економії часу, а і як засіб запобігання надлишковому спалюванню палива внаслідок поспіху до порту та подальшого простою на якорі [14].

Перспективним напрямом сучасних досліджень є застосування цифрових двійників у морському транспорті. У публікаціях цього напрямку цифровий двійник трактується як динамічна модель судна, його підсистем або маршруту, яка безперервно оновлюється на основі експлуатаційних даних і дає можливість оцінювати наслідки рішень до їх практичної реалізації. У роботі [15] такий підхід використано для маршрутизації судна з урахуванням вимог декарбонізаційного регулювання, що дозволило поєднати реальні експлуатаційні та метеорологічні дані з фізичною моделлю оцінювання викидів [15]. У ширшому контексті цифрові двійники розглядаються як інструмент енергетичного менеджменту, моделювання режимів роботи, оцінювання технічного стану судна та аналізу сценаріїв підвищення енергоефективності [15].

Значна увага в останніх дослідженнях приділяється також застосуванню штучного інтелекту (AI), машинного навчання (ML) та технічного обслуговування на основі прогнозування стану. Наукові й прикладні публікації свідчать, що великі масиви експлуатаційних даних, судової сенсорика, рейсова звітність та технічні параметри обладнання формують підґрунтя для прогнозування енергоспоживання, виявлення енергоефективних режимів роботи та раннього виявлення відхилень у технічному стані обладнання [16, 17]. Для судових енергетичних установок це особливо важливо, оскільки діагностування технічного стану та контроль паливної економічності безпосередньо пов'язані з витратою палива й експлуатаційною ефективністю [16, 18]. Окремі аналітичні матеріали також підкреслюють, що інструменти штучного інтелекту можуть бути ефективними для прогнозного технічного обслуговування, підвищення надійності обладнання та підтримки операційних рішень у судноплаванні [17].

Ще одним важливим напрямом наукових публікацій є цифровізація портів і декарбонізація ланцюга перевезення. Дослідники відзначають, що істотна частка надлишкових викидів формується на стику взаємодії судна з портом унаслідок неузгодженості операцій, неточності інформації про розрахунковий час прибуття судна

(estimated time of arrival, ETA), затримок на підходах та простоїв суден із працюючими допоміжними двигунами. У цьому контексті дедалі більшої уваги набувають портові цифрові платформи та цифрові двійники портів. Так, у роботі [19] продемонстровано можливість використання портового цифрового двійника для покращення прогнозу часу прибуття суден і викидів CO<sub>2</sub> під час рейсу [19]. Водночас стратегічні документи ІМО та регіональні акти ЄС підкреслюють значення розвитку берегового електропостачання, постачання низьковуглецевої енергії та оптимізації логістичного ланцюга як важливих складових декарбонізації морської галузі [1, 9].

Поряд із визнанням значного потенціалу цифровізації в науковій літературі окреслюються і її обмеження. Насамперед ідеться про залежність результативності цифрових інструментів від якості даних, коректності калібрування сенсорів, повноти телеметрії та сумісності інформаційних форматів. У джерелі [3] серед ключових бар'єрів цифрової трансформації морського транспорту розглядаються питання, пов'язані з драйверами, чинниками успіху та бар'єрами цифровізації, зокрема проблемами інтеграції та організаційної взаємодії [3]. Крім того, сучасні підходи ІМО до оцінювання викидів у межах життєвого циклу палива засвідчують перехід від вузького підходу «від суднового танка до вихлопу» (tank-to-wake), який передбачає оцінювання викидів парникових газів тільки під час експлуатації судна, до ширшого – «від джерела до вихлопу» (well-to-wake), що охоплює повний життєвий цикл палива – від його виробництва, перероблення й транспортування до кінцевого використання на борту судна, і вимагає врахування не лише факту спалювання палива на борту, а й його походження, життєвого циклу та показників його екологічного впливу на довкілля [20, 21].

Отже, аналіз останніх досліджень і публікацій дає підстави стверджувати, що цифрові інструменти дедалі більше розглядаються як системна основа декарбонізації морського транспорту. Вони забезпечують зв'язок між технічною експлуатацією судна, оптимізацією рейсу, енергетичним менеджментом, портовою координацією та виконанням регуляторних вимог. Водночас подальших досліджень потребують питання інтеграції цих інструментів у єдині цифрові екосистеми, здатні забезпечувати комплексне управління енергоефективністю, викидами та екологічною відповідністю морського транспорту.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Цифровізація морського транспорту у сучасних умовах виступає не лише засобом підвищення операційної ефективності, а й важливим інструментом забезпечення декарбонізації судноплавства. Її практичне значення полягає у формуванні цілісного інформаційного контуру, в межах якого дані про роботу судна, його енергетичної установки, маршрут, портову взаємодію та паливне забезпечення перетворюються на підставу для прийняття технічних, експлуатаційних і рішень щодо дотримання нормативних вимог.

1. Цифрові дані як основа декарбонізації, що здійснюється під впливом нормативних вимог. Перша група цифрових інструментів пов'язана з моніторингом, звітністю та аналітикою показників енергоефективності і викидів. Саме розвиток таких систем робить реальним виконання вимог СІІ, SEEMP та DCS. Цифрова платформа енергетичного моніторингу зазвичай об'єднує суднові датчики, лічильники витрати палива, дані Глобальної системи позиціонування / Автоматичної ідентифікаційної системи (GPS/AIS), метеорологічну інформацію, дані про режими роботи суднової енергетичної установки, а також берегові аналітичні модулі. У практичному вимірі це означає перехід від звітності за минулий період до майже безперервної оцінки вуглецевої інтенсивності конкретного рейсу, судна і навіть окремого режиму роботи енергетичної установки. Наукові розробки у цій сфері вже пропонують спрощені, але достатньо інформативні системи моніторингу. Зокрема, у дослідженні [10] розроблено спрощену систему контролю для малих і середніх суден, яка на основі обмеженого набору даних (GPS, витрата палива, частота обертання) здатна визначати швидкість, потужність, витрату палива, оцінку викидів CO<sub>2</sub> та ефективність судна з передаванням інформації до берегового центру в реальному часі [10]. Важливість цієї роботи полягає в тому, що декарбонізація вимагає цифрових рішень не лише для великих океанських суден, а й для прибережного, сервісного та малого тоннажу, де ресурсні обмеження особливо відчутні. Водночас сам збір даних ще не гарантує результату. Ефект виникає тоді, коли цифровий контур перетворює дані на керівні дії: прогноз досягнення рейтингу СІІ, попередження про зростання витрати палива, автоматизовану перевірку відповідності звітності, порівняння фактичного профілю енерговитрат із базовим або контрактним. У публікаціях IMarEST підкреслюється, що саме дані, отримані в ході операцій, стають основою для скорочення витрат палива та викидів, а оптимізація

використання вантажомісткості судна та організації рейсу на основі даних може забезпечувати значне підвищення ефективності [11]. Отже, цифровий моніторинг слід розглядати не як форму звітності заради звітності, а як механізм управління декарбонізаційним ризиком.

2. Оптимізація рейсу, швидкості та погодної маршрутизації. Друга велика група інструментів – це системи оптимізації рейсу, погодної маршрутизації, прибуття точно в строк та інтегрованого планування рейсу. Вони прямо впливають на витрати палива і викиди, оскільки дають змогу уникати нераціональних розгонів, необґрунтовано високої сервісної швидкості, тривалого очікування біля порту та проходження маршрутів із високим хвильовим опором. У дослідженнях з навігаційної оптимізації вже доведено, що врахування прогнозованих гідрометеорологічних умов забезпечує вибір більш паливоективних маршрутів без зниження рівня безпеки судноплавства [12]. Інші роботи пропонують спеціалізовані алгоритми погодної маршрутизації, які забезпечують зниження показника вуглецевої інтенсивності судна за одночасного врахування безпеки плавання, графіка руху та енергоефективності [13]. З погляду декарбонізації принципово важливим є відхід від ізольованого планування судном лише власного переходу. Реальний ефект з'являється, коли оптимізація маршруту узгоджується з часовим вікном обслуговування судна в порту, готовністю причалу, вантажно-технологічними операціями терміналу та логістичним ланцюгом. Саме тому сучасні підходи до прибуття точно в строк розглядаються як інструмент не тільки економії часу, а й уникнення зайвого спалювання палива через поспіх до порту з подальшим простоем на якорі. IMarEST у матеріалах щодо інтелектуальних транспортних систем для морської галузі вказує, що поєднання судна, порту і логістики у спільну цифрову архітектуру дає менші затримки, зменшує черги та викиди, а адаптивна оптимізація швидкості вже сама по собі може істотно скорочувати емісії [14]. Практичне значення таких систем особливо зросло після запровадження СІІ та регіональних механізмів вуглецевого регулювання. За наявності прогнозу погоди, фактичного осідання, вантажного профілю, стану корпусу та гвинта оператор отримує можливість у реальному часі вирішувати компроміс між строком доставки, рейтингом СІІ, витратами на паливо та потенційними вуглецевими платежами. Тобто цифрова маршрутизація перетворюється на інструмент багатокритеріального управління, а не просто на навігаційну допомогу.

3. Цифрові двійники судна та енергетичних систем. Одним із найперспективніших напрямів вважається застосування цифрових двійників. Для морського транспорту цифровий двійник – це динамічна цифрова модель судна, його підсистем або маршруту, яка безперервно оновлюється експлуатаційними даними та дозволяє оцінювати наслідки рішень до їх фактичної реалізації. Для декарбонізації це має вирішальне значення, оскільки двійник дозволяє моделювати вплив швидкості, стану моря, технічного стану, типу палива, стратегій розподілу навантаження або використання гібридних енергетичних установок на паливоспоживання та викиди. У [15] запропоновано цифровий двійник для маршрутизації судна з урахуванням виконання вимог декарбонізаційного регулювання. Запропонований підхід поєднує реальні експлуатаційні й метеорологічні дані з фізичною моделлю оцінки викидів і дає змогу прогнозувати ймовірність відповідності судна нормативним вимогам впродовж рейсу [15]. Така постановка є надзвичайно важливою, бо переносить цифровий двійник з рівня технічної візуалізації на рівень підтримки рішень щодо забезпечення відповідності встановленим вимогам. Іншими словами, цифровий двійник перестає бути лише моделлю стану судна і стає інструментом декарбонізаційного менеджменту. У ширшому науковому контексті цифрові двійники розглядаються також як засіб оптимізації роботи пропульсивного комплексу, енергетичного менеджменту гібридних установок, аналізу відхилень фактичної витрати палива від еталонної, оцінки ефекту очищення корпусу та гвинта, а також верифікації сценаріїв переходу на альтернативні палива. Для судових механіків це формує новий підхід до технічної експлуатації судових систем: технічний стан і викиди розглядаються спільно, а рішення щодо обслуговування, налаштування або ремонту приймаються з урахуванням їхнього екологічного ефекту. У результаті декарбонізація перестає бути завданням лише комерційного департаменту або екологічного менеджменту і стає частиною системи технічної експлуатації судна.

4. Прогнозування, штучний інтелект і технічне обслуговування на основі прогнозування стану. Наступна група цифрових інструментів пов'язана з машинним навчанням, прогнозною аналітикою та технічним обслуговуванням за фактичним станом. Наукові огляди засвідчують, що великі обсяги експлуатаційних даних, дані сенсорного контролю, рейсова звітність та гідрометеорологічна інформація є фундаментом для точного прогнозування енергоспоживання суден і

пошуку енергоефективних режимів [22]. Чим точніше система прогнозує споживання палива за реальних умов, тим ефективніше вона може підтримувати рішення щодо швидкості, розподілу навантаження, очищення підводної частини, коригування графіка технічного обслуговування та вибору маршруту. Технічне обслуговування на основі прогнозування стану має безпосередній декарбонізаційний потенціал, хоча в традиційних обговореннях він часто недооцінюється. Погіршення стану форсунок, турбоагнітача, систем наддуву, теплообмінних поверхонь, лінії валопроводу або підводної частини корпусу поступово підвищує питомі витрати палива [16, 18]. Якщо ці відхилення виявляються не під час планового ремонту, а набагато раніше - за допомогою алгоритмів аномалій, цифрових профілів навантаження та прогнозних моделей, - судно уникає систематичних прихованих викидів. У цьому сенсі інструменти штучного інтелекту та машинного навчання є не додатком до технічної експлуатації, а способом запобігання енергетичній деградації судна. IMarEST також відзначає роль штучного інтелекту в оптимізації маршруту, врахуванні погоди, трафіку, цін на паливо та інтеграції з портовою логістикою для зменшення простоїв і витрат палива [14, 17]. Водночас застосування таких інструментів у морській галузі потребує обережності: моделі повинні бути зрозумілими для екіпажу та берегових операторів, навчатися на репрезентативних даних і не підміняти собою критерії безпеки судноплавства. Найбільш продуктивним є поєднання фізичних моделей судна з алгоритмами машинного навчання, коли цифрова система не просто прогнозує результат, а інтерпретує його через реальні експлуатаційні параметри.

5. Портова цифровізація та декарбонізація ланцюга перевезення. Значна частина надлишкових викидів формується не лише в рейсі, а й на стику судна з портом. Запізнена інформація про готовність причалу, неузгодженість вантажно-технологічних операцій терміналу, відсутність точного часу прибуття судна, простої на підходах та стоянка з працюючими допоміжними двигунами зумовлюють додаткове спалювання палива. Саме тому в Стратегії ІМО 2023 року прямо звертається увага на розвиток портової інфраструктури, берегового електропостачання, постачання низьковуглецевої енергії та подальшу оптимізацію логістичного ланцюга, включаючи порти [1]. У цьому контексті значний інтерес становлять портові цифрові двійники. У роботі [19] створено портовий цифровий двійник, який використовує спільні дані морських стейкхолдерів і алгоритм інтерактивного

планування для покращення прогнозу часу прибуття суден та викидів CO<sub>2</sub> під час рейсу. Значення такого підходу полягає в тому, що об'єктом декарбонізації стає не окреме судно, а узгоджена система «судно - порт - термінал - ланцюг доставки». Відповідно скорочення викидів досягається не лише завдяки альтернативному паливу, а й завдяки усуненню операційної неузгодженості. Регіональні механізми нормативного регулювання додатково стимулюють цифровізацію портової діяльності. FuelEU Maritime прямо підтримує використання відновлюваних і низьковуглецевих палив, чистих технологій і берегового електропостачання [9]. Це означає, що порти повинні мати не тільки фізичну інфраструктуру, а й цифрові платформи для верифікації джерела енергії, енергетичного балансу, режиму підключення судна, відстеження параметрів, передбачених FuelEU Maritime, та обміну даними з судноплавною компанією і верифікатором. Без такої цифрової надбудови навіть наявність технічної інфраструктури не забезпечить належного декарбонізаційного результату.

6. Межі ефективності цифрових інструментів. Попри значний потенціал, цифровізацію не можна розглядати як самодостатнє рішення. По-перше, її результативність залежить від якості даних: помилки в калібруванні датчиків, розриви телеметрії, несумісність форматів або спотворення вхідних параметрів призводять до хибних управлінських рішень. По-друге, цифрові системи вимагають стандартизації та належного рівня довіри між зацікавленими сторонами. Огляд цифрової трансформації морського транспорту виокремлює брак стандартів і кооперації як одну з ключових перешкод [3]. По-третє, декарбонізація не зводиться до оптимізації експлуатації: навіть найкраща цифрова система не замінить необхідності оновлення флоту, впровадження альтернативних палив, використання берегової енергії та модернізації енергетичних установок. Разом із тим саме цифрові інструменти забезпечують узгодження технологічних, експлуатаційних і нормативних рішень. Міжнародна морська організація у керівництвах щодо оцінювання інтенсивності викидів парникових газів упродовж життєвого циклу морських палив переходить від підходу «від судового паливного танка до вихлопу» до підходу «від виробництва палива до його використання на борту судна», охоплюючи вуглекислий газ, метан і закис азоту та вводячи маркування життєвого циклу палива як технічний інструмент обліку [20, 21]. Це означає, що в подальшому цифрові платформи мають працювати не лише з даними про спалювання палива на борту, а й з верифікацією його походжен-

ня, життєвого циклу та екологічних характеристик. Отже, майбутнє цифрової декарбонізації морського транспорту полягає в інтеграції судових, портових, логістичних і паливних даних в єдині екосистеми прийняття рішень.

З огляду на викладене, у таблиці 1 наведено узагальнений опис і обмеження використання основних цифрових інструментів декарбонізації.

Таблиця 1. Основні цифрові інструменти декарбонізації морського транспорту

| <b>Інструмент</b>  | <b>Джерело даних</b>   | <b>Декарбонізаційний ефект</b>  | <b>Основні обмеження</b>   |
|--|--|---|--|
| Системи моніторингу та аналітики паливоспоживання, викидів і вуглецевої інтенсивності судна (MRV/DCS/СП-аналітики) | Дані про паливоспоживання, GPS/AIS, параметри головних і допоміжних механізмів, журнали режимів роботи, рейсові, метеорологічні та вантажні дані   | Забезпечують безперервний контроль паливоспоживання, викидів і вуглецевої інтенсивності судна; створюють інформаційну основу для виявлення відхилень, підвищення енергоефективності та дотримання екологічних вимог                           | Результативність залежить від точності датчиків, повноти та безперервності збору даних, уніфікації форматів обміну інформацією, коректності верифікації показників, а також від узгодженості судових і берегових інформаційних систем      |
| Оптимізація рейсу, погодна маршрутизація   | Прогнозовані й фактичні гідрометеорологічні умови, дані про осідання судна, швидкість і режим руху, розрахунковий час прибуття, часові вікна портового обслуговування, характеристики вантажу, параметри стану корпусу і рушійного комплексу | Сприяють вибору паливоективних маршрутів і режимів руху, зменшенню надлишкової швидкості, простоїв на підходах до порту, експлуатаційних викидів і ризику погіршення вуглецевої інтенсивності, а також узгодженню судових і портових операцій | Ефективність залежить від точності прогнозів погоди, якості даних про технічний і вантажний стан судна, своєчасної інформації від порту та узгодження між вимогами безпеки, графіком перевезення і завданнями мінімізації паливоспоживання |

Продовження таблиці 1

| Інструмент  | Джерело даних   | Декарбонізаційний ефект   | Основні обмеження  |
|---|---|---|--|
| Цифрові двійники  | Фізичні та математичні моделі судна і його підсистем, телеметрія в реальному часі, експлуатаційні дані енергетичної установки, навігаційна інформація, метеорологічні параметри, дані про технічний стан корпусу, рушійного комплексу та допоміжного обладнання | Дозволяють моделювати режими роботи судна, прогнозувати вплив швидкості, стану моря, навантаження, технічного стану та типу палива на паливоспоживання і викиди; підтримують обґрунтування рішень щодо підвищення енергоефективності, технічного обслуговування та дотримання екологічних і нормативних вимог | Вимагають високого рівня інтеграції різнорідних джерел даних, наявності валідованих фізичних і математичних моделей, значних обчислювальних ресурсів, регулярного оновлення параметрів моделі та складної процедури підтвердження достовірності результатів моделювання                |
| Інструменти штучного інтелекту, машинного навчання (AI/ML) та прогнозного технічного обслуговування | Дані попередніх спостережень і поточного контролю роботи обладнання, параметри рейсу, навігаційні та погодні дані, дані сенсорного контролю, записи про технічне обслуговування і ремонт, показники паливоспоживання та навантаження енергетичної установки     | Забезпечують раннє виявлення погіршення технічного стану обладнання, прогнозування відмов і неефективних режимів роботи, запобігання прихованому зростанню питомих витрат палива, підвищення точності експлуатаційних рішень і зниження викидів за рахунок своєчасного технічного втручання                   | Обмежуються залежністю від якості й репрезентативності даних, складністю інтерпретації результатів, ризиком перенавчання моделей, потребою в їх адаптації до нових умов експлуатації та необхідністю узгодження алгоритмічних висновків із вимогами надійності й безпеки судноплавства |

Закінчення таблиці 1

| Інструмент                                    | Джерело даних   | Декарбонізаційний ефект  | Основні обмеження   |
|---|---|--|---|
| Портові цифрові платформи та цифрові двійники | Дані про розрахунковий час прибуття судна, графіки швартування та розподілу суден за причалами, вантажно-технологічні операції терміналів, інформація про підключення до берегового електроживлення, дані щодо використання низьковуглецевих видів енергії, відомості про завантаженість портової інфраструктури та взаємодію з логістичними учасниками | Сприяють організації прибуття суден точно в строк, зменшенню черг і простоїв на підходах до порту, скороченню зайвого спалювання палива під час очікування, поліпшенню енергетичного балансу в порту та узгодженню судових, портових і термінальних операцій у межах декарбонізаційної стратегії | Впровадження ускладнюється потребою в міжорганізаційній сумісності інформаційних систем, високими вимогами до кібербезпеки, неоднорідністю цифрової зрілості учасників портового середовища, потребою в стандартизації обміну даними та значними витратами на створення й підтримку цифрової інфраструктури |

### Висновки і перспективи подальших досліджень.

1. Декарбонізація морського транспорту в сучасних умовах вже не може бути реалізована винятково за рахунок переходу на нові види палива або встановлення окремих технічних рішень. Її необхідною умовою є цифровізація судових, портових і логістичних процесів, оскільки саме цифрові інструменти забезпечують вимірюваність, прогнозованість і керуваність викидів.

2. Найбільший практичний ефект для декарбонізації дає поєднання п'яти класів інструментів: систем моніторингу та звітності щодо енергоефективності; оптимізації маршруту, швидкості та часу прибуття; цифрових двійників судна й порту; систем прогнозування на основі штучного інтелекту та машинного навчання; інтегрованих платформ координації між судном, портом і логістичним ланцюгом.

3. Цифрові інструменти особливо цінні тим, що вони переносять декарбонізацію з площини загальних цілей у сферу практичних експлуатаційних рішень щодо управління рухом судна, планування його заходу до порту, обирання режиму роботи енергетичної установки, визначення строків технічного обслуговування обладнання та оцінювання фактичного екологічного ефекту палива за його життєвим циклом.

4. Водночас ефективність цифровізації обмежується якістю даних, відсутністю єдиних стандартів, фрагментацією інформаційних потоків, кіберризиками та недостатньою підготовкою персоналу. Отже, подальші дослідження і практичні проекти доцільно спрямовувати на інтеграцію цифрових платформ із вимогами Міжнародної морської організації, регламенту FuelEU Maritime, системи торгівлі квотами на викиди Європейського Союзу та підходу, що ґрунтується на оцінюванні життєвого циклу палива, а також на розвиток компетентностей екіпажу та берегових фахівців у сфері управління судновою енергоефективністю на основі даних.

#### ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Resolution MEPC.377(80) – 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, adopted on 7 July 2023.

2. Agarwala P. Using digitalisation to achieve decarbonisation in the maritime transport sector. *Journal of Shipping and Trade*. 2021. <https://doi.org/10.1080/25725084.2021.2009420>.

3. Tijan E., Jovic M., Aksentijevic S., Pucihar A. Digital transformation in the maritime transport sector. *Technological Forecasting and Social Change*. 2021. Vol. 170. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120879>.

4. Improving the energy efficiency of ships. *International Maritime Organization*: website. URL: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/improving%20the%20energy%20efficiency%20of%20ships.aspx> (date: 02.03.2026)

5. Resolution MEPC.395(82) – 2024 guidelines for the development of a ship energy efficiency management plan (SEEMP), adopted on 4 October 2024.

6. IMO Data Collection System (DCS). *International Maritime Organization*: website.

URL: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/data-collection-system.aspx> (date: 23.02.2026)

7. MEPC.1/Circ.871/Rev.1 – Guidance for submission of data to the IMO Data Collection System of fuel oil consumption of ships from a State not party to MARPOL Annex VI, 24 June 2022.

8. FAQ - Maritime transport in EU Emissions Trading System (ETS). *European Commission*: website. URL: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/reducing-emissions-shipping-sector/faq-maritime-transport-eu-emissions-trading-system-ets\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/reducing-emissions-shipping-sector/faq-maritime-transport-eu-emissions-trading-system-ets_en) (date: 26.02.2026)

9. Decarbonising maritime transport - FuelEU Maritime. *European Commission*: website. URL: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/reducing-emissions-shipping-sector/faq-maritime-transport-eu-emissions-trading-system-ets\\_en?utm\\_source](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/reducing-emissions-shipping-sector/faq-maritime-transport-eu-emissions-trading-system-ets_en?utm_source) (date: 23.02.2026)

10. Kim S., Kim H., Jeon H. Development of a Simplified Performance Monitoring System for Small and Medium Sized Ships. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11, no. 9. Article 1734. <https://doi.org/10.3390/jmse11091734>.

11. Wang J, Lee K, Fu X, et al. Data-driven decarbonization in the maritime industry: An integrative analytical review. *Communications in Transportation Research*, 2026. <https://doi.org/10.26599/COMMTR.2026.9640002>

12. Kytariolou A., Delis A., Ventikos Y., Hamann R. Ship routing optimisation based on forecasted weather data and considering safety criteria. *Journal of Navigation*. 2022. <https://doi.org/10.1017/S0373463322000613>.

13. Sun W., Wang H., Zhang H. et al. An Improved Ship Weather Routing Framework for CII Reduction Accounting for Wind-Assisted Rotors. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, no. 12. Article 1979. <https://doi.org/10.3390/jmse10121979>.

14. Why maritime must act now on Intelligent Transport Systems. *Institute of Marine Engineering, Science and Technology*: website. 2026. URL: <https://www.imarest.org/resource/why-maritime-must-act-now-on-intelligent-transport-systems.html> (date: 02.03.2026)

15. Wei Q., Liu Y., Dong Y., Li T., Li W. A digital twin framework for real-time ship routing considering decarbonization regulatory compliance. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 278. Article 114407. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114407>.

16. Сагін С.В., Парменова Д.Г. Діагностування технічного стану суднових дизелів. *Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник*. Вип. 51. Одеса: НУОМА, 2025. С. 66-77. <https://doi.org/10.31653/smf51.2025.66-77>.

17. Artificial intelligence in shipping. 2026. *Institute of Marine Engineering, Science and Technology*: website. URL: [https://www.imarest.org/resource/mp-artificial-intelligence-in-shipping.html?utm\\_source](https://www.imarest.org/resource/mp-artificial-intelligence-in-shipping.html?utm_source) (date: 02.03.2026)

18. Сагін С.В., Парменова Д.Г., Верпека А.О. Підвищення паливної економічності дизелів суден морського транспорту. *Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник*. Вип. 50. Одеса: НУОМА, 2025. С. 102-115. <https://doi.org/10.31653/50.2025.102-115>.

19. Eom J.-O., Yoon J.-H., Yeon J.-H., Kim S.-W. Port Digital Twin Development for Decarbonization: A Case Study Using the Pusan Newport International Terminal. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11, no. 9. Article 1777. <https://doi.org/10.3390/jmse11091777>.

20. IMO framework on life cycle GHG intensity of marine fuels (LCA). *International Maritime Organization*: website. URL: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/lifecycle-ghg---carbon-intensity-guidelines.aspx> (date: 02.03.2026)

21. Resolution MEPC.391(81) – International Maritime Organization. 2024 Guidelines on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels (2024 LCA Guidelines), adopted on 22 March 2024.

22. Wang K., Yan X., Yuan Y., Jiang X. et al. A comprehensive review on the prediction of ship energy consumption and emissions. *Ocean Engineering*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112826>.