

МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.61:65.012.12

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2026.1-28.06>

АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ТА ФОРМУВАННЯ КОНЦЕПЦІЇ КОМЕРЦІЙНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДЕН З УРАХУВАННЯМ ВИМОГ ІМО

А.О. Дорошева

кандидат історичних наук, доцент, доцент кафедри судноводіння та експлуатації
технічних систем на водному транспорті,

Відокремлений структурний підрозділ «Дунайський інститут водного транспорту
Національного транспортного університету», Ізмаїл, Одеська обл., Україна

ORCID ID: 0000-0003-3257-7173

Анотація

Сучасна система морських вантажних перевезень функціонує в умовах зростаючої конкуренції, цифрової трансформації та посилення міжнародних регуляторних вимог у сфері безпеки й охорони довкілля. Комерційна експлуатація суден більше не може розглядатися виключно як економічна діяльність, орієнтована на максимізацію прибутку, оскільки вона суттєво залежить від технологічних параметрів перевезень, енергетичної ефективності та виконання нормативних вимог Міжнародної морської організації (ІМО). У зв'язку з цим актуалізується потреба у створенні інтегрованих моделей комерційної експлуатації суден, здатних поєднати економічні, технологічні та регуляторні фактори в єдину систему управління.

Метою статті є розроблення концептуального підходу до моделювання процесів комерційної експлуатації морських суден з урахуванням технологічних особливостей вантажних перевезень і регуляторних вимог ІМО, а також оцінювання їх впливу на економічну ефективність судноплавної діяльності.

У роботі проаналізовано структуру процесів комерційної експлуатації суден та обґрунтовано доцільність застосування системного й економіко-математичного підходів до їх моделювання. Запропоновано концептуальну модель, яка інтегрує показники доходів і витрат, технологічні параметри рейсу, енергетичні характеристики та нормативні обмеження ІМО. Досліджено можливості використання імітаційного моделювання, цифрових двійників, систем моніторингу енергоспоживання та інтелектуальних алгоритмів для підвищення точності прогнозування експлуатаційних і економічних результатів. Показано, що впровадження вимог ІМО (SOLAS, MARPOL, EEDI, EEXI, SEEMP) безпосередньо впливає на експлуатаційну швидкість, витрати палива, тривалість рейсів і загальну ефективність комерційної діяльності судноплавних компаній.

Запропонований підхід до моделювання процесів комерційної експлуатації суден забезпечує комплексне врахування економічних, технологічних і регуляторних



чинників, що підвищує обґрунтованість управлінських рішень. Результати дослідження можуть бути використані у практиці судноплавних компаній для оптимізації експлуатаційної діяльності, а також у навчальному процесі й подальших наукових дослідженнях у сфері морського транспорту.

Ключові слова: комерційна експлуатація суден, моделювання, морські вантажні перевезення, технологія перевезень, вимоги ІМО, енергоефективність, цифрові технології, економічна ефективність.

MODELING OF COMMERCIAL SHIP OPERATION PROCESSES WITH CONSIDERATION OF TECHNOLOGICAL AND REGULATORY IMO REQUIREMENTS

A.O. Dorosheva

Assistant Professor at the Department of Navigation and Operation
of Technical Systems in Water Transport,
Separated Structural Unit “Danube Institute of Water Transport of National Transport University”,
Izmail, Odesa Region, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-3257-7173

Summary

Modern maritime freight transportation operates under conditions of increasing competition, digital transformation, and tightening international regulatory requirements related to safety and environmental protection. Commercial ship operation can no longer be considered solely as an economic activity aimed at profit maximization, as it is significantly influenced by technological parameters of cargo transportation, energy efficiency, and compliance with the regulations of the International Maritime Organization (IMO). In this context, the development of integrated models of commercial ship operation that combine economic, technological, and regulatory factors within a unified management framework becomes particularly relevant.

The purpose of the article is to develop a conceptual approach to modeling the processes of commercial operation of maritime vessels, taking into account the technological features of cargo transportation and the regulatory requirements of the IMO, as well as to assess their impact on the economic efficiency of shipping activities.

The paper analyzes the structure of commercial ship operation processes and substantiates the feasibility of applying systemic and economic-mathematical approaches to their modeling. A conceptual model is proposed that integrates revenue and cost indicators, technological parameters of voyages, energy performance characteristics, and IMO regulatory constraints. The potential of simulation modeling, digital twins, energy consumption monitoring systems, and intelligent algorithms for improving the accuracy of forecasting operational and economic outcomes is examined. It is demonstrated that the implementation of IMO requirements (SOLAS, MARPOL, EEDI, EEXI, SEEMP) has a direct impact on vessel operating speed, fuel consumption, voyage duration, and overall commercial efficiency of shipping companies.

The proposed approach to modeling commercial ship operation processes ensures a comprehensive consideration of economic, technological, and regulatory factors, thereby enhancing the validity of managerial decision-making. The research results can be applied in the practical activities of shipping companies to optimize operational

performance, as well as in educational processes and further scientific studies in the field of maritime transport.

Key words: *commercial ship operation, modeling, maritime cargo transportation, transport technology, IMO requirements, energy efficiency, digital technologies, economic efficiency.*

Вступ. Актуальність дослідження зумовлена зростанням вимог до ефективності комерційної експлуатації суден в умовах посилення міжнародного регуляторного впливу та ускладнення технологій морських перевезень. Регулювання Міжнародної морської організації (ІМО) у сферах безпеки, енергоефективності та охорони довкілля істотно впливає на експлуатаційні параметри суден і економічні результати судноплавних компаній. У зв'язку з цим виникає потреба в удосконаленні моделей комерційної експлуатації суден, які забезпечують комплексне врахування економічних, технологічних і регуляторних чинників та підвищують обґрунтованість управлінських рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових публікацій свідчить про зростаючу увагу дослідників до проблем підвищення ефективності експлуатації морських суден в умовах цифровізації та посилення міжнародних регуляторних вимог. Значна кількість робіт присвячена застосуванню цифрових технологій у системах технічного обслуговування флоту. Зокрема, у працях І. В. Грицука та ін. [1], а також А. І. Голованя [2] розглядаються підходи до використання цифрових двійників і цифрових стратегій для оцінювання та прогнозування технічного стану суднового обладнання, що сприяє переходу до предиктивного технічного обслуговування та зниженню експлуатаційних ризиків.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із підвищенням енергоефективності та зниженням екологічного впливу морського транспорту. У роботі І. О. Пуляєва, М. П. Булгакова, О. М. Мельника [3] та інших авторів аналізуються інноваційні технології, альтернативні види палива й нормативна база ІМО, спрямовані на скорочення споживання палива та викидів забруднюючих речовин. Дослідження В. В. Нікольського та співавторів [4] демонструють ефективність використання бездротових систем моніторингу для оптимізації режимів роботи суднових дизельних установок.

У контексті моделювання експлуатаційних процесів увага приділяється імітаційному моделюванню та інтелектуальним методам аналізу даних. Робота Т. Зайцевої та співавторів [5] показує можливості використання імітаційних моделей для врахування впливу зовнішніх факторів на рух судна, тоді як дослідження В. В. Голікова та К. О. Сінюти [6] висвітлює перспективи застосування методів глибокого навчання в морській навігації.

Водночас більшість наявних досліджень зосереджена або на техніко-технологічних аспектах експлуатації суден, або на окремих економічних чи екологічних показниках. Питання інтеграції технологічних рішень і регуляторних вимог ІМО (SOLAS, MARPOL, EEDI, EEXI, SEEMP) у комплексні моделі комерційної експлуатації суден залишаються недостатньо систематизованими. Це зумовлює доцільність подальших досліджень, спрямованих на формування інтегрованих моделей, які поєднують економічні, технологічні та нормативні чинники в єдину систему управління комерційною експлуатацією суден.

Формулювання цілей статті. Метою статті є розроблення та обґрунтування концептуального підходу до моделювання процесів комерційної експлуатації морських суден з урахуванням технологічних особливостей вантажних перевезень і регуляторного впливу Міжнародної морської організації (ІМО). Досягнення поставленої мети передбачає інтеграцію економічних, технологічних і нормативних чинників у єдину модель управління експлуатаційною діяльністю судноплавних компаній з метою підвищення ефективності та обґрунтованості управлінських рішень.

Виклад основного матеріалу. Комерційна експлуатація суден є складною системою взаємопов'язаних процесів, що охоплює фрахтування, планування рейсів, управління доходами та витратами, а також забезпечення відповідності міжнародним регуляторним нормам. Її основною метою є досягнення економічної ефективності за умови дотримання технічних, технологічних і нормативних обмежень.



Рис. 1. Структурно-логічна схема процесів комерційної експлуатації суден

З позицій системного підходу комерційна експлуатація розглядається як динамічний процес, що залежить від характеристик судна, типу вантажу, маршруту перевезення та зовнішніх регуляторних факторів. Моделювання таких процесів передбачає формалізоване відображення експлуатаційної діяльності з використанням економіко-математичних та імітаційних методів з метою оптимізації рейсової діяльності та підтримки управлінських рішень.

Технологія морських вантажних перевезень визначає послідовність і тривалість операцій з обробки вантажу, що безпосередньо впливає на комерційні показники рейсу. До ключових технологічних елементів належать операції завантаження, морський перехід та розвантаження.

Тип вантажу, технічні характеристики судна та умови портової інфраструктури формують технологічні обмеження, які мають бути враховані при моделюванні експлуатації судна. Неefективна технологія перевезення призводить до зростання витрат і зниження конкурентоспроможності судноплавної компанії.

Сучасні технологічні рішення істотно розширили можливості моделювання. До ключових технологічних чинників належать наступні (таб. 1).

Таблиця 1

**Цифрові технології, що використовуються
у моделюванні комерційної експлуатації суден**

Технологія	Призначення	Результат застосування
Цифрові двійники	Моделювання технічного стану	Зниження експлуатаційних ризиків
Імітаційне моделювання	Аналіз сценаріїв рейсу	Оптимізація тривалості рейсу
Системи моніторингу	Контроль енергоспоживання	Зменшення витрат палива
Алгоритми ШІ	Прогнозування витрат і відмов	Підтримка управлінських рішень

По-перше, формування цифрових стратегій. Цифрова трансформація систем технічного обслуговування вантажних суден є відповіддю на зростаючу складність експлуатації флоту та підвищені вимоги до безпеки, економічної ефективності й екологічної відповідальності. Значні втрати, спричинені неплановими відмовами обладнання та нераціональним використанням ресурсів, зумовлюють перехід від традиційних підходів до інтелектуально орієнтованих цифрових стратегій управління технічним станом суден.

Використання цифрових стратегій базується на інтеграції експлуатаційних даних і аналітичних методів обробки інформації, що створює основу для застосування цифрових моделей і цифрових двійників суден. Поєднання цифрових двійників із методами предиктивної аналітики забезпечує перехід до прогнозованого технічного обслуговування, підвищує точність оцінювання технічного стану та зменшує ризик несподіваних відмов під час експлуатації [1, с. 280–286].

Формування структурно-логічної схеми впровадження цифрових стратегій у системи технічного обслуговування вантажних суден забезпечує узгодження процесів моніторингу, аналізу даних, прогнозування відмов і прийняття рішень. Такий підхід дозволяє зменшити витрати на непланові ремонти, підвищити надійність суднових технічних засобів і забезпечити більш стабільні експлуатаційні показники флоту. Одночасно з цим цифрові двійники створюють умови для навчання та підвищення кваліфікації екіпажу шляхом моделювання різних сценаріїв експлуатації та аварійних ситуацій у віртуальному середовищі.

Упровадження цифрових стратегій на основі цифрових моделей, цифрових тіней і цифрових двійників у поєднанні з прескриптивною аналітикою трансформують систему технічного обслуговування вантажних суден у адаптивну, прогнозовану та ресурсозберігаючу. Така трансформація сприяє підвищенню ефективності експлуатації суден, зниженню економічних і техногенних ризиків та формує науково-практичну основу для подальшого розвитку інтелектуальних систем управління життєвим циклом морського флоту [2, с. 151–157].

По-друге, системи моніторингу енергоспоживання, які використовуються для оптимізації швидкості та маршруту. Підвищення енергоефективності морського транспорту є важливим чинником сталого розвитку судноплавної галузі в умовах посилення міжнародного екологічного регулювання та зростання вартості енергоресурсів. Значна частка викидів, пов'язаних із морськими перевезеннями, зумовлює необхідність удосконалення підходів до експлуатації суден і управління енергоспоживанням.

Нормативні ініціативи Міжнародної морської організації орієнтовані на поєднання проєктних і експлуатаційних заходів зниження енергоспоживання, зокрема через застосування індикаторів енергоефективності та планів управління енергетичними режимами суден. Використання цифрових інструментів і аналітичних моделей дозволяє здійснювати моніторинг енергетичних показників, оптимізувати режими руху та маршрути, а також прогнозувати споживання палива в реальних умовах експлуатації.

Поєднання експлуатаційних заходів з інноваційними технологічними рішеннями, включаючи використання альтернативних видів палива, створює передумови для скорочення витрат палива, зниження викидів і підвищення економічної ефективності комерційної експлуатації суден [3, с. 58–64].

Використання бездротових систем моніторингу в експлуатації суднових дизельних установок є ефективним інструментом підвищення надійності, енергоефективності та екологічної безпеки морських перевезень. Інтеграція сенсорних мереж і програмних платформ забезпечує безперервний контроль ключових параметрів роботи дизелів у режимі реального часу та створює передумови для переходу до предиктивного технічного обслуговування. Оптимізація режимів роботи й оперативне виявлення відхилень дозволяють знизити витрату палива і викиди CO₂, скоротити простої та підвищити ресурс обладнання, а дистанційний доступ до систем моніторингу сприяє інтеграції їх з іншими бортовими інформаційно-керуючими комплексами судна [4, с. 82–86].

Використання водневого палива в суднових енергетичних установках розглядається як один із найбільш перспективних напрямів декарбонізації морського транспорту в умовах посилення міжнародних екологічних вимог. Водень характеризується високою енергетичною ефективністю та практично нульовими викидами CO₂ під час використання, що робить його привабливою альтернативою традиційним вуглеводневим паливам. Водночас ефективне впровадження водневих технологій потребує комплексного підходу, який охоплює виробництво, зберігання, подавання та утилізацію водню на борту судна [7, с. 256–260].

Значний потенціал енергозбереження досягається за рахунок удосконалення суднових енергетичних установок, зокрема застосування дизельних двигунів з турбонаддуванням, впровадження систем утилізації теплоти відпрацьованих газів та використання сучасних систем паливопідготовки. Додатковий ефект забезпечується зменшенням гідродинамічного опору корпусу судна шляхом використання необростаючих покриттів, що сприяє зниженню витрат палива під час руху.

Енергозбереження на водному транспорті також значною мірою залежить від організаційних заходів, зокрема оптимізації завантаження судна, дотримання регламентів технічного обслуговування, постійного моніторингу технічного стану систем і раціонального планування маршрутів. Комплексна реалізація технічних і організаційних рішень дозволяє знизити енерговитрати на перевезення вантажів і пасажирів та підвищити економічну ефективність експлуатації флоту [8].

Комплексне поєднання нормативних вимог, цифрових технологій, математичного моделювання та інноваційних технічних рішень формує нову парадигму управління енергоспоживанням на морському транспорті. Такий підхід забезпечує не лише відповідність міжнародним екологічним стандартам, а й підвищення

економічної ефективності експлуатації суден, зниження витрат палива та зміцнення конкурентоспроможності судноплавних компаній у довгостроковій перспективі.

Ще одним технологічним чинником є імітаційне моделювання рейсів, що враховує погодні умови, завантаження портів і часові обмеження.

Процеси комерційної експлуатації суден відбуваються в умовах постійної дії змінних зовнішніх факторів, зокрема вітру, хвилювання та течій, які безпосередньо впливають на параметри руху судна, його керованість, швидкість та безпеку плавання. У зв'язку з цим ефективне управління експлуатаційними режимами суден потребує використання формалізованих підходів, здатних адекватно відображати реальні умови мореплавства та підтримувати прийняття управлінських рішень відповідно до вимог Міжнародної морської організації (ІМО).

Імітаційне моделювання розглядається як ключовий інструмент дослідження та оптимізації експлуатаційних процесів, оскільки воно дозволяє відтворювати динаміку руху судна з урахуванням сукупного впливу технологічних і природних факторів. Побудова математичних моделей, що враховують істинні та відносні параметри вітру, дрейф судна, зміну курсу і швидкості, забезпечує можливість прогнозування наслідків управлінських рішень ще до їх реалізації на практиці. Такий підхід відповідає концепції ризик-орієнтованого управління, закладеної в сучасних нормативних документах ІМО.

Використання цифрових інструментів для реалізації імітаційних моделей (зокрема табличних та алгоритмічних середовищ) дає змогу автоматизувати розрахунки, знизити вплив суб'єктивних помилок та оперативно аналізувати альтернативні сценарії експлуатації судна. Це створює підґрунтя для оптимізації комерційних показників рейсу за одночасного дотримання вимог безпеки, енергоефективності та екологічних обмежень. Таким чином, імітаційне моделювання є методологічною основою для інтеграції технологічних і регуляторних вимог ІМО у моделі процесів комерційної експлуатації суден [5, с. 21–27].

Наступна група чинників – інтелектуальні алгоритми та машинне навчання, які застосовуються для прогнозування попиту, витрат і технічних відмов.

Сучасні процеси судноводіння та комерційної експлуатації суден характеризуються високою складністю, зумовленою динамічною навігаційною обстановкою, багатоканальністю інформаційних потоків і жорсткими вимогами до безпеки та відповідності міжнародним нормам. За таких умов традиційні аналітичні моделі мають обмежені можливості щодо обробки великих обсягів різномірних даних і прогнозування поведінки судна в реальному часі, що зумовлює доцільність інтеграції методів штучного інтелекту, зокрема глибокого навчання.

Методи глибокого навчання дозволяють формувати адаптивні моделі для аналізу навігаційних, сенсорних і метеорологічних даних, створюючи основу для інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень з оцінювання навігаційних ризиків, оптимізації маршрутів і режимів руху суден. Особливу цінність такі підходи мають для автоматизованого та напівавтоматизованого керування, водночас їх застосування потребує обов'язкового врахування міжнародних регуляторних вимог, зокрема правил запобігання зіткненням суден і стандартів безпеки ІМО.

Разом з тим обмежена доступність якісних навчальних даних, вимоги до надійності та пояснюваності рішень і питання кібербезпеки зумовлюють необхідність

поєднання методів глибокого навчання з класичними фізико-математичними та імітаційними моделями з метою підвищення достовірності результатів моделювання [6, с. 108–110].

Таким чином, інтеграція методів глибокого навчання у моделі судноводіння та комерційної експлуатації суден формує основу для переходу до інтелектуальних, ризик-орієнтованих систем управління, здатних забезпечити підвищення безпеки, ефективності та відповідності експлуатаційних процесів сучасним технологічним і регуляторним вимогам.

Технологічні моделі дозволяють інтегрувати великі масиви даних (Big Data) та формувати сценарії експлуатації з різним рівнем ризику й економічної ефективності.

Важливою особливістю сучасного моделювання комерційної експлуатації суден є необхідність жорсткого врахування регуляторних вимог Міжнародна морська організація (таб. 2).

Таблиця 2

**Вплив регуляторних вимог ІМО
на параметри комерційної експлуатації суден**

Норматив ІМО	Об'єкт впливу	Експлуатаційний ефект
SOLAS	Безпека судноплавства	Обмеження експлуатаційних режимів
MARPOL	Викиди та паливо	Зростання витрат на екологічні заходи
EEDI	Проектна енергоефективність	Обмеження конструктивних параметрів
EEXI	Існуючі судна	Зниження максимальної швидкості
SEEMP	Управління енергією	Оптимізація експлуатації

До ключових напрямів такого регуляторного впливу належать, в першу чергу, безпека судноплавства, що регламентується положеннями Конвенції SOLAS (International Convention for the Safety of Life at Sea) та Міжнародного кодексу з управління безпекою (ISM Code) [9; 10], які встановлюють вимоги до системи управління безпекою судна, підготовки екіпажу та експлуатаційних процедур.

Наступний напрям – охорона навколишнього середовища, визначена Конвенцією MARPOL 73/78, зокрема Додатком VI, який запроваджує обмеження на викиди SO_x, NO_x та CO₂, а також встановлює вимоги щодо використання низькосірчистого палива та експлуатації суден у зонах контролю викидів (ECA) [11].

Під пильним наглядом міжнародних стандартів перебуває енергоефективність суден, що реалізується через вимоги EEDI (Energy Efficiency Design Index) для новобудов та EEXI (Energy Efficiency Existing Ship Index) і SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan) для існуючого флоту відповідно до рішень ІМО щодо скорочення викидів парникових газів [12; 13].

Не менш важливим є експлуатаційна надійність і технічний стан, які забезпечуються через систему обов'язкових оглядів, сертифікації та контролю відповідності суден міжнародним конвенціям ІМО.

У математичних та імітаційних моделях ці вимоги реалізуються шляхом введення нормативних обмежень, регуляторних коефіцієнтів та сценаріїв відповідності/невідповідності, що дозволяє оцінювати наслідки порушення міжнародних стандартів, а також ефективність інвестицій у модернізацію флоту (наприклад,

встановлення скруберів або обмеження максимальної швидкості судна для досягнення відповідності ЕЕХІ).

З економічної точки зору вимоги ІМО виступають системою зовнішніх обмежень, які безпосередньо впливають на експлуатаційну швидкість судна, витрати пального, тривалість рейсу, структуру витрат і загальну ефективність комерційної експлуатації. У зв'язку з цим інтеграція регуляторних факторів ІМО в модель комерційної діяльності судноплавної компанії є необхідною умовою адекватного прогнозування економічних результатів та прийняття управлінських рішень.

Висновки. Аналіз процесів комерційної експлуатації морських суден продемонстрував їхню багатофакторну природу, зумовлену взаємодією економічних, технологічних і регуляторних чинників. Встановлено, що технологія вантажних перевезень, енергетичні характеристики суден та дотримання вимог ІМО істотно впливають на експлуатаційні параметри рейсів і економічні результати судноплавної діяльності. Розгляд підходів до моделювання комерційної експлуатації суден показав доцільність інтеграції показників доходів і витрат, технологічних параметрів рейсу та регуляторних обмежень у єдину модель управління. Застосування імітаційного моделювання та цифрових інструментів дозволяє враховувати вплив нормативних вимог ІМО на експлуатаційну швидкість, витрати палива, тривалість рейсів і загальну економічну ефективність перевезень. Узагальнення отриманих результатів свідчить, що використання комплексних моделей комерційної експлуатації суден створює умови для підвищення обґрунтованості управлінських рішень, оптимізації експлуатаційних режимів і адаптації судноплавних компаній до змін технологічного та регуляторного середовища.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з поглибленням автоматизації моделей комерційної експлуатації суден, розширенням використання методів штучного інтелекту та інтеграцією оперативних даних у режимі реального часу. Доцільним є подальше вдосконалення моделей з урахуванням динамічних змін регуляторних вимог ІМО, розвитку альтернативних видів палива та переходу до інтелектуальних систем управління експлуатацією флоту на основі прогнозних і ризик-орієнтованих підходів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Грицук І. В. та ін. Особливості оцінювання і прогнозування стану судових теплообмінних апаратів в системі експлуатації на основі технології цифрових двійників. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки.* 2025. Вип. 51 С. 275–290. doi: 10.31498/2225-6733.51.2025.344965
2. Головань А. І. Формування цифрових стратегій для вирішення задач підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки.* 2023. Вип. 46. С. 149–158. doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288184
3. Пуляєв І. О., Булгаков М. П., Мельник О. М. Інноваційні технології та нормативна база для оптимізації енергоспоживання на морському транспорті. *Розвиток транспорту.* 2025. Вип. 2 (25). С. 56–70. doi: <https://doi.org/10.33082/td.2025.2-25.05>

4. Нікольський В. В. та ін. Оптимізація експлуатації суднових дизелів за допомогою бездротових систем моніторингу. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2025. № 1 (30). С. 80–91. doi: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.080-091
5. Зайцева Т. В., Кравцова Л. В., Терещенкова О. В. Використання імітаційного моделювання при підготовці судноводіїв: вплив зовнішніх факторів на характеристики руху судна. *Journal of Information Technologies in Education* 2021. № 2 (47). С. 17–34. doi: 10.14308/ite000742
6. Голяков В. В., Сінюта К. О. Глибоке навчання у контексті штучного інтелекту в морській навігації: перспективи розвитку. *Водний транспорт*. 2024. № 1 (39). С. 104–111. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.10
7. Булгаков М. П., Мельник О. П. Розроблення адаптивного алгоритму використання водневого палива в суднових енергетичних установках. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2025. Вип. 211. С. 253–269. doi: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327172>
8. Голубєва С. М., Морнева М. О., Пастух О. В. Застосування енергозберігаючих та природоохоронних технологій на водному транспорті. *Наукові вісті Дніпровського університету*. 2023. doi: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2023-24-4>
9. International Maritime Organization. International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974, as amended. London : IMO, 1974.
10. International Maritime Organization. International Safety Management (ISM) Code. London : IMO, 1993 (as amended).
11. International Maritime Organization. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL), 1973, as modified by the Protocol of 1978 (MARPOL 73/78). London : IMO, 1973/1978.
12. International Maritime Organization. Resolution MEPC.203(62). Amendments to the Annex of the MARPOL Convention (Energy Efficiency Design Index – EEDI). London : IMO, 2011.
13. International Maritime Organization. Resolution MEPC.328(76). Amendments to MARPOL Annex VI (Energy Efficiency Existing Ship Index – EEXI). London : IMO, 2021.

REFERENCES

1. Hrytsuk, I. V., *et al.* (2025). Assessment and forecasting features of ship heat exchangers condition in operation systems based on digital twin technology [Osoblyvosti otsiniuvannya i prohnozuvannya stanu sudnovykh teploobminnykh aparativ v systemi ekspluatatsii na osnovi tekhnologii tsyfrovyykh dviinykiv]. *Bulletin of the Pryazovskyi State Technical University. Series: Technical Sciences*, 51, 275–290. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344965> [in Ukrainian].
2. Holovan, A. I. (2023). Formation of digital strategies for solving problems of improving the efficiency of maintenance systems of cargo vessels

- [Formuvannia tsyfrovyykh stratehii dlia vyrishennia zadach pidvyshchennia efektyvnosti system tekhnichnoho obsluhovuvannia vantazhnykh suden]. *Bulletin of the Pryazovskyi State Technical University. Series: Technical Sciences*, 46, 149–158. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288184> [in Ukrainian].
3. Puliaiev, I. O., Bulhakov, M. P., & Melnyk, O. M. (2025). Innovative technologies and regulatory framework for optimizing energy consumption in maritime transport [Innovatsiini tekhnolohii ta normatyvna baza dlia optymizatsii enerhospozhyvannia na morskomu transporti]. *Transport Development*, 2 (25), 56–70. <https://doi.org/10.33082/td.2025.2-25.05> [in Ukrainian].
 4. Nikolskyi, V. V., et al. (2025). Optimization of ship diesel engine operation using wireless monitoring systems [Optymizatsiia ekspluatatsii sudnovykh dyzeliv za dopomohoiu bezdrovovykh system monitorynhu]. *Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy*, 1 (30), 80–91. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.080-091> [in Ukrainian].
 5. Zaytseva, T. V., Kravtsova, L. V., & Tereshchenkova, O. V. (2021). Use of simulation modeling in the training of navigators: The impact of external factors on ship motion characteristics [Vykorystannia imitatsiinoho modeliuvannia pry pidhotovtsi sudnovodiiv: vplyv zovnishnykh faktoriv na kharakterystyky rukhu sudna]. *Journal of Information Technologies in Education*, 2 (47), 17–34. <https://doi.org/10.14308/ite000742> [in Ukrainian].
 6. Holikov, V. V., & Siniuta, K. O. (2024). Deep learning in the context of artificial intelligence in maritime navigation: Development prospects [Hlyboke navchannia u konteksti shtuchnoho intelektu v morskii navihatsii: perspektyvy rozvytku]. *Water Transport*, 1 (39), 104–111. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.10> [in Ukrainian].
 7. Bulhakov, M. P., & Melnyk, O. P. (2025). Development of an adaptive algorithm for hydrogen fuel utilization in ship power plants [Rozroblennia adaptivnoho alhorytmu vykorystannia vodnevoho palyva v sudnovykh enerhetychnykh ustanovkakh]. *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 211, 253–269. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327172> [in Ukrainian].
 8. Holubieva, S. M., Morneva, M. O., & Pastukh, O. V. (2023). Application of energy-saving and environmental protection technologies in water transport [Zastosuvannia enerhozberihaiuchykh ta pryrodookhoronnykh tekhnolohii na vodnomu transporti]. *Scientific Bulletin of Dalius University*, 24 (4). <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2023-24-4> [in Ukrainian].
 9. International Maritime Organization. (1974). *International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974, as amended*. London, UK: IMO.
 10. International Maritime Organization. (1993). *International Safety Management (ISM) Code (as amended)*. London, UK: IMO.
 11. International Maritime Organization. (1973/1978). *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL 73/78)*. London, UK: IMO.

12. International Maritime Organization. (2011). *Resolution MEPC.203(62). Amendments to the Annex of the MARPOL Convention (Energy Efficiency Design Index – EEDI)*. London, UK: IMO.
13. International Maritime Organization. (2021). *Resolution MEPC.328(76). Amendments to MARPOL Annex VI (Energy Efficiency Existing Ship Index – EEXI)*. London, UK: IMO.

Дата першого надходження статті до видання: 27.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026