

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

ВИПУСК 1(28), 2026

Заснований у жовтні 2016 року



Видавничий дім
«Гельветика»
2026

**ОДЕСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ
НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ**

№ 1(28)
2026

Заснований у жовтні 2016 року

Виходить 4 рази на рік

Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа:
Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення
№ 1547 від 09.05.2024 року. Ідентифікатор медіа: R30-04557

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Одеський національний морський університет
(вул. Мечникова, буд. 34, м. Одеса, 65029, priem@onmu.org.ua, тел. +38(048)732-23-05)

На підставі Наказу Міністерства освіти і науки України № 1188 від 24.09.2020 р.
(додаток 5) журнал внесений до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б»):
С1 Економіка, D3 Менеджмент, D6 Секретарська та офісна справа, G11 Машинобудування
(за спеціалізаціями), J5 Морський та внутрішній водний транспорт, J6 Авіаційний транспорт,
J7 Залізничний транспорт, J8 Автомобільний транспорт

Засновник:

Одеський національний морський університет
Україна, 65029, м. Одеса, вул. Мечникова, 34

Редакційна колегія:

Головний редактор – Мінчев Дмитро Степанович
доктор технічних наук, доцент, професор кафедри суднових енергетичних систем та комплексів,
Одеський національний морський університет, Україна

Члени редакційної колегії:

Варбанець Роман Анатолійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри суднових енергетичних систем та комплексів, Одеський національний морський університет, Україна
Мельник Олексій Миколайович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Україна
Малаксіано Микола Олександрович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри технічної кібернетики й інформаційних технологій ім. проф. Р.В. Меркта, Одеський національний морський університет, Україна
Кириллова Олена Вікторівна, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри експлуатації портів і технологій вантажних робіт, Одеський національний морський університет, Україна
Пітерська Варвара Михайлівна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри експлуатації портів і технологій вантажних робіт, Одеський національний морський університет, Україна

Збігнев Корчевський (Zbigniew Korczewski), доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри суднових енергетичних установок, Гданський технологічний університет, Республіка Польща
Вацлав Піштек (Václav Pištěk), доктор технічних наук, професор, професор факультету машинобудування Інституту автомобільної інженерії, Технологічний університет Брно, Чеська Республіка
Серджан Вуйич (Srdjan Vujčić), доктор філософії, доцент, завідувач кафедри суднових енергетичних установок, Університет Дубровника, Республіка Хорватія
Митрофанов Олександр Сергійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри двигунів внутрішнього згоряння, установок та технічної експлуатації, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна
Коробко Володимир Владиславович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри експлуатації СЕУ та теплоенергетики, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна
Пуздrowsька Патриція (Puzdrowska Patrycja), PhD, доцент, доцент кафедри суднових енергетичних установок, Гданський технологічний університет, Республіка Польща

Рецензенти: д.е.н. В.В. Жихарсва, к.т.н. О.В. Шербина, О.І. Сагайдак, д.т.н. О.О. Каніфольський,
д.т.н. О.Я. Хлісва, д.т.н. В.М. Пітерська, д.т.н. А.В. Конопльов

Рекомендовано до друку Вченою радою
Одеського національного морського університету
(протокол № 12 від 22.04.2026 р.)

Відповідальність за достовірність фактів, цитат, власних імен, географічних назв,
назв підприємств, організацій, установ та іншої інформації несуть автори статей.
Висловлені у цих статтях думки можуть не збігатися з точкою зору редакційної колегії, не покладають на неї ніяких зобов'язань.
Передруки і переклади дозволяються лише за згодою автора та редакції.

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою
програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

ISSN 2616-7360

© Одеський національний морський університет, 2026

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

ODESSA
NATIONAL MARITIME UNIVERSITY

TRANSPORT DEVELOPMENT

Scientific journal

ISSUE 1(28), 2026

Founded in October 2016



Publishing House
"Helvetica"
2026

ODESSA
NATIONAL MARITIME UNIVERSITY
TRANSPORT DEVELOPMENT
SCIENTIFIC JOURNAL

№ 1(28)
2026

Founded in October 2016

Frequency: four times a year

Registration of Print media entity:
Decision of the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine
No. 1547 as of 09.05.2024. Media ID: R30-04557

Media entity – Odessa National Maritime University (Odesa, 65029, Mechnikova Str., 34,
priem@onmu.org.ua, tel. +38(048)732-23-05)

Pursuant to the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 1188
dated 24.09.2020 (Appendix 5), the journal is included in the List of scientific professional publications
of Ukraine (category “B”): C1 Economics, D3 Management, D6 Secretarial and Office Management,
G11 Mechanical Engineering (with specializations), J5 Maritime and Inland Water Transport,
J6 Air Transport, J7 Railway Transport, J8 Road Transport

Founder:
Odessa National Maritime University
Ukraine, 65029, Odesa, 34 Mechnykova St.

Editorial Board:
Editor-in Chief: Minchev Dmytro Stepanovych
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department
of Ship Energy Systems and Complexes, Odessa National Maritime University, Ukraine

Editorial Board Members:

Varbanets Roman Anatoliiovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Ship Energy Systems and Complexes, Odessa National Maritime University, Ukraine

Melnyk Oleksii Mykolaiovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Navigation and Maritime Safety, Odessa National Maritime University, Ukraine

Malaksiano Mykola Oleksandrovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technical Cybernetics and Information Technology named after prof. R.V. Merkt, Odessa National Maritime University, Ukraine

Kyrylova Olena Viktorivna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Port Operation and Cargo Operations Technology, Odessa National Maritime University, Ukraine

Piterska Varvara Mykhailivna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Port Operation and Cargo Operations Technology, Odessa National Maritime University, Ukraine

Zbigniew Korczewski, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Ship Power Plants, Gdansk University of Technology, Republic of Poland
Václav Pištěk, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Automotive Engineering, Brno University of Technology, Czech Republic

Mytrofanov Oleksandr Serhiiovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Internal Combustion Engines, Installations and Technical Operation, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ukraine

Korobko Volodymyr Vladyslavovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Ship Power Plants Operation and Heat Energy, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ukraine
Srdjan Vujicic, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Ship Power Plants, University of Dubrovnik, Republic of Croatia

Puzdrowska Patrycja, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Marine Power Plants, Gdansk University of Technology, Republic of Poland

Reviewers: Doctor of Economics Zhykhareva, PhD in Engineering O.V. Shcherbyna, O.I. Sahaydak,
Doctor of Engineering O.O. Kanifolskyi, Doctor of Engineering O.Ya. Khlieva, Doctor of Engineering V.M. Piterska,
Doctor of Engineering A.V. Konoplov

Recommended for printing by the Academic Council of Odessa National Maritime University
(Minutes No 12 dated April 22, 2026)

Authors are responsible for the reliability of facts, quotes, proper names, geographical names,
names of enterprises, organizations, institutions and other information.

The Editorial Board may not share the authors' opinion
and assumes no responsibility for the content of manuscripts.

Reprinting and translation are allowed with the consent of author and editors.

The articles were checked for plagiarism using the software StrikePlagiarism.com
developed by the Polish company Plagiat.pl.

З М І С Т

МЕНЕДЖМЕНТ

- О.О. Демідюк, А.В. Бондар**
Концепція гібридного підходу в управлінні проектами в галузі суднобудування.....7
- М.О. Хобта, В.М. Сукманюк, М.К. Матвєєва**
Порівняльний статистичний аналіз бізнес-середовища країн Європейського Союзу та України (на прикладі транспортної галузі).....19

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

- В.П. Мальчевський, Н.І. Александровська, О.В. Єриганов**
Дослідження можливості складання єдиного рівняння стану суміші холодоагентів 3,3,3-трифторпропен (R1243zf) + ізобутан (R600a) за наявними експериментальними даними.....32
- Л.В. Пізінцалі, О.І. Россомаха, С.М. Дімова, О.А. Россомаха**
Життєвий цикл судна як фактор техногенного впливу: екологічний аналіз етапів та заходи мінімізації.....42
- O.V. Fomin, O.V. Burlutskyi, M.V. Khara, A.S. Krasulin**
Microstructural evolution and gradient nanostructuring of the surface of parts under the influence of shot blasting.....58

МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

- А.О. Дорошева**
Аналіз моделей та формування концепції комерційної експлуатації суден з урахуванням вимог ІМО.....75
- В.П. Савчук, Є.В. Білоусов, Ю.М. Кучеренко, Д.В. Курносенко**
Аналіз точності методів розрахунку сил інерції кривошипно-шатунного механізму малооберткових дизелів.....87
- В.І. Свиридов, Н.Б. Андрєєва, О.І. Соломенцев**
Діагностування дефектів роторів суднових відцентрових насосів, пов'язаних з розбалансуванням, під час їхньої експлуатації.....102

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

- І.М. Герасименко, С.В. Пронь, О.В. Пронь**
Безпілотні технології як інструмент оптимізації гуманітарних перевезень та забезпечення екологічної безпеки.....113
- О.Є. Луппо, Г.Ф. Аргунов, М.М. Богуненко**
Вплив використання гібридних та водневих повітряних суден на процедури управління повітряним рухом.....129
- Р.Т. Мартинюк, О.Т. Чернова**
Вплив хімічного складу сталі магістральних та промислових трубопроводів на якість зварювання.....142

C O N T E N T S

MANAGEMENT

- O. O. Demidiuk, A. V. Bondar**
Concept of a hybrid approach to project management in the shipbuilding industry.....7
- M. O. Khobta, V.M. Sukmaniuk, M.K. Matveeva**
Comparative statistical analysis of the business environment of the European Union and Ukraine (using the example of the transport industry).....19

INDUSTRIAL MECHANICAL ENGINEERING

- V.P. Malchevsky, N.I. Aleksandrovska, O.V. Yeryganov**
Investigation of the possibility of compiling a unified equation of state for a mixture of 3,3,3-trifluoro-propene (R1243zf) + isobutane (R600a) based on available experimental data.....32
- L.V. Pizintali, O.I. Rossomakha, S.M. Dimova, O.A. Rossomakha**
The life cycle of a ship as a factor of technological impact: ecological analysis of stages and minimization measures.....42
- O.V. Fomin, O.V. Burlutskyi, M.V. Khara, A.S. Krasulin**
Microstructural evolution and gradient nanostructuring of the surface of parts under the influence of shot blasting.....58

SEA AND INLAND WATER TRANSPORT

- A.O. Dorosheva**
Modeling of Commercial Ship Operation Processes with Consideration of Technological and Regulatory IMO Requirements.....75
- V.P. Savchuk, Ie.V. Bilousov, Yu. M. Kucherenko, D.V. Kurnosenko**
Analysis of the accuracy of methods for calculating the inertia forces of the crank-connecting rod mechanism of low-speed diesel engines.....87
- V.I. Svyrydov, N.B. Andrieieva, O.I. Solomyentsev**
Diagnosis of rotor defects of marine centrifugal pumps related to unbalance during their operation.....102

TRANSPORT TECHNOLOGIES (BY TYPE)

- I.M. Herasymenko, S.V. Pron, O.V. Pron**
Unmanned technologies as a tool for optimizing humanitarian transportation and ensuring environmental safety.....113
- O.Ye. Luppo, H.F. Arhunov, M.M. Bohunenko**
Impact of the use of hybrid and hydrogen aircraft on air traffic management procedures.....129
- R.T. Martynyuk, O.T. Chernova**
Influence of the chemical composition of steel of main and industrial pipelines on welding quality.....142

МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 658.5

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2026.1-28.01>

КОНЦЕПЦІЯ ГІБРИДНОГО ПІДХОДУ В УПРАВЛІННІ ПРОЄКТАМИ В ГАЛУЗІ СУДНОБУДУВАННЯ

О.О. Демідюк¹, А.В. Бондар²

¹здобувач вищої освіти третього навчально-наукового рівня (PhD)
кафедри управління логістичними системами та проєктами,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0009-0003-8761-2180

²доктор технічних наук, професор, професор кафедри управління
логістичними системами і проєктами,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0003-2228-2726

Анотація

Вступ. Розглядається існуюча методологія управління проєктами в галузі суднобудування. Показано, що традиційна спіраль дизайну суден Дж. Х. Еванса потребує цифрової адаптації. Проаналізовані сучасні технології, що застосовуються в управлінні проєктами в програмній та цивільній інженерії, включаючи Model-Based Systems Engineering (MBSE), Digital Twin та принципи Agile System Engineering (Agile SE). **Мета.** Метою дослідження є формування гібридної концепції у вигляді інтеграції традиційної спіралі дизайну суден з сучасними методологіями управління складними інженерними системами, а саме MBSE, Digital Twin та принципами Agile SE. **Результати.** Проведено аналіз літературних джерел з теми дослідження та порівняння проєктних підходів за основними критеріями. Аналіз показує збільшення кількості робіт із підтримки цифровізації в інженерних галузях, зокрема в суднобудуванні. Проаналізовані переваги та недоліки кожної із складових гібридної концепції. Показано, що гібридний підхід, що поєднує структуру системної інженерії та адаптивність Agile, може значно підвищити ефективність процесів проєктування, скоротити час і забезпечити гнучкість щодо вимог, які швидко змінюються. Від гібридного підходу слід очікувати зниження ризику інтеграції модулів, покращення управління вартісними показниками на етапах розробки та впровадження, дотримання термінів розробки та підвищення адаптивності платформи. Зазначено, що перехід до гібридної концепції (особливо до Agile SE) у суднобудуванні вимагає змін в управлінні, організаційного впровадження MBSE та Digital Twin, а також дотримання архітектурної дисципліни модульності. Наведено приклади успішного застосування гібридних підходів у суднобудуванні, зокрема проєкти Navantia F-110, Rolls-Royce Marine та Hyundai Heavy Industries. **Висновки.** Запропоновано рекомендації щодо



формування цифрової «спіралі проектування» на основі Agile SE, концепції цифрового двійника та її впровадження в процес управління суднобудівними підприємствами та проектами в галузі суднобудування.

Ключові слова: спіраль проектування; гібридні підходи; цифровізація; Agile; Agile SE; суднобудування; MBSE; Digital Twin.

CONCEPT OF A HYBRID APPROACH TO PROJECT MANAGEMENT IN THE SHIPBUILDING INDUSTRY

O. O. Demidiuk¹, A. V. Bondar²

¹student of higher education of the third educational and scientific level (PhD)
Department of Management Logistics Systems and Projects,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0009-0003-8761-2180

²Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Management Logistics Systems and Projects,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-2228-2726

Summary

Introduction. The existing project management methodology in shipbuilding is considered. It is shown that J. H. Evans' traditional ship design spiral requires digital adaptation. Modern technologies used in project management in software and civil engineering are analyzed, including Model-Based Systems Engineering (MBSE), Digital Twin, and Agile System Engineering (Agile SE) principles. **Purpose.** The purpose of the study is to form a hybrid concept in the form of integrating the traditional ship design spiral with modern methodologies for managing complex engineering systems, namely MBSE, Digital Twin, and Agile SE principles. **Results.** An analysis of literary sources on the research topic and a comparison of design approaches based on key criteria were conducted. The analysis shows an increase in the number of works supporting digitalization in engineering fields, particularly in shipbuilding. The advantages and disadvantages of each component of the hybrid concept were analyzed. It was shown that a hybrid approach, combining the structure of systems engineering and the adaptability of Agile, can significantly improve the efficiency of design processes, reduce time, and provide flexibility in response to rapidly changing requirements. The hybrid approach is expected to reduce the risk of module integration, improve cost management during the development and implementation stages, ensure compliance with development deadlines, and increase platform adaptability. It is noted that the transition to a hybrid concept (especially Agile SE) in shipbuilding requires changes in management, organizational implementation of MBSE and Digital Twin, as well as adherence to the architectural discipline of modularity. Examples of the successful application of hybrid approaches in shipbuilding are given, in particular the Navantia F-110, Rolls-Royce Marine, and Hyundai Heavy Industries projects. **Conclusions.** Recommendations are proposed for the formation of a digital "design spiral" based on Agile SE, the concept of a digital twin, and its implementation in the management process of shipbuilding enterprises and projects in the shipbuilding industry.

Key words: design spiral; hybrid approaches; digitalization; Agile; Agile System Engineering; shipbuilding; MBSE; Digital Twin.

Постановка проблеми. Проектування суден давно визнано одним із найскладніших інженерних процесів через його міждисциплінарний характер і тривалий життєвий цикл.

Як і інші інженерні області, сучасне суднобудування стикається із зростанням складності систем, складністю їх інтеграції, вимогами сталого розвитку, необхідністю ефективного управління процесом проектування та наступними етапами виробництва, експлуатації, модернізації та утилізації. Традиційна спіральна модель, запропонована Дж. Х. Евансом (1959) [1], стала знаковою, оскільки в ній проектування представлено як ітеративний процес. Розроблена для проектування торговельних суден, ця спіраль пізніше була адаптована до військово-морських проєктів з урахуванням впливу специфічних бойових систем, більш жорсткіших вимог до живучості та застосування нових технологій. Як і в інших галузях, у суднобудівній промисловості наразі триває етап цифрової трансформації. У ситуації, коли команда розробників може бути географічно розкидана по всьому світу, безпаперове проектування, розробка цифрових прототипів і тісна цифрова взаємодія стають нормою.

Застосування традиційної спіралі проектування (далі – ТСП) в сучасних умовах потребує цифрової адаптації. Інтеграція системної інженерії (SE), методів Model-Based Systems Engineering (MBSE) і гнучких підходів Agile відкриває нові можливості для підвищення ефективності та керованості суднобудівних проєктів.

Метою дослідження є розробка концепції інтеграції класичної спіралі проектування з Agile System Engineering та сучасними цифровими підходами до управління проєктами. Завдання включають аналіз переваг та обмежень спірального методу, розгляд сучасних методологій MBSE, Digital Twin та Agile, а також визначення напрямів їх ефективного поєднання в суднобудуванні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційна спіраль проектування Дж. Х. Еванса [1] – це ітераційний процес, у якому кожен виток відповідає циклу уточнення параметрів судна – від формування вимог до конструкторської документації. Процес включає етапи розробки концепції, вибору архітектурно-конструктивного типу, визначення головних розмірів, вибору оптимальної форми корпусу, оцінки фундаментальної конструкції корпусу, загальної та локальної міцності, стійкості, потужності та вартості. Сильними сторонами спірального підходу є системність та ітераційність, що дозволяє наближатися до оптимальних характеристик шляхом повторних ітерацій (циклів) із постійним системним покращенням параметрів.

Типовий вигляд спіралі проектування показаний на рис. 1.

Незважаючи на системний підхід, використання класичних каскадних схем і проєктних спіралей виявляється недостатнім для своєчасної адаптації в умовах різкого скорочення часу (з 2÷2,5 років до 1÷1,5 років)

і укрупнення етапів проектування. В найбільш екстремальних випадках початкові етапи побудови судна йдуть паралельно із кінцевими етапами проектування.

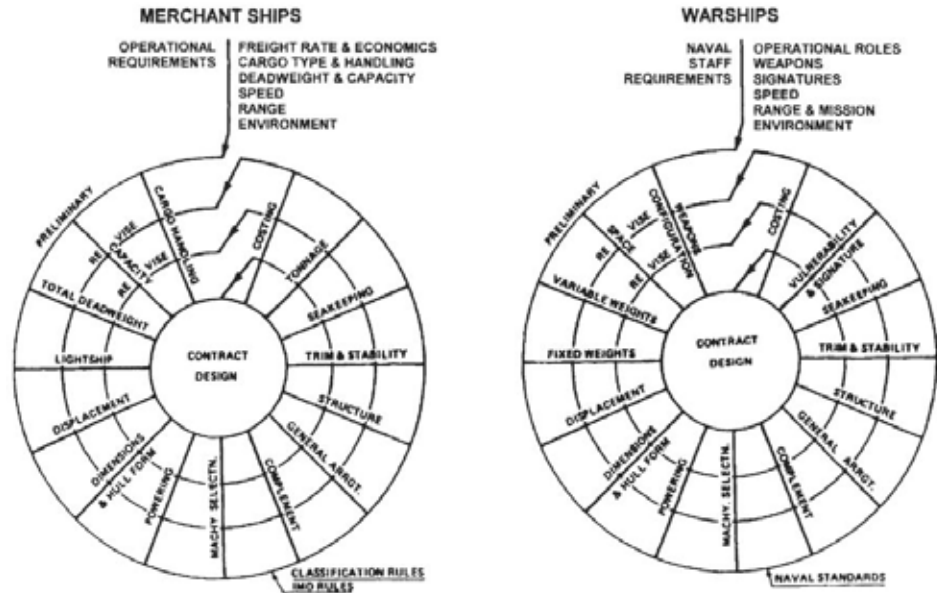


Рис. 1. Дизайн спіралі, запропонований Дж. Х. Евансом для цивільних суден (ліворуч) і для військових кораблів (праворуч) [2]

Сучасні методології, які забезпечують ефективне управління проектами та цифрову трансформацію суднобудування, включають Model-Based Systems Engineering (MBSE), Digital Twin.

MBSE [3] переводить проектування в модельно-орієнтоване середовище, забезпечуючи вимоги та відстежуваність архітектури. MBSE виникла як відповідь на обмеження традиційних спіральних методів. Вона використовує формальні моделі для відображення вимог, архітектур і поведінки. MBSE тісно пов'язана з мовами моделювання, такими, як SysML та UML. MBSE притаманна краща узгодженість, цифрова спадкоємність, раннє виявлення конфліктів при проектуванні та інтеграція з інструментами моделювання. Серед негативних наслідків використання MBSE слід зазначити круту криву складності навчання (за аналогією з Об'єктно Орієнтованим Програмуванням), опір з боку традиційних спільнот фахівців та ризик надмірної формалізації там, де потрібна гнучкість.

Технологія Digital Twin [4] є однією з найпередовіших розробок у галузі проектування суден. Підтримуючи віртуальне представлення судна, яке розвивається разом із фізичним активом, «цифрові двійники» забезпечують предиктивне обслуговування, моніторинг продуктивності та оптимізацію життєвого циклу.

Digital Twin дозволяє створити динамічну цифрову копію судна для аналізу поведінки та оптимізації рішень. Перевагами цих підходів є формалізація, відстежуваність і швидке прийняття рішень, покращений зворотний зв'язок під час експлуатації, інтеграція життєвого циклу, покращене планування технічного обслуговування та оптимізація на основі даних. До недоліків можна віднести високу вартість впровадження та необхідність змінити менталітет членів команди проєкту (потреба культурних змін) а також залежність від високоякісних даних, вразливість з точки зору кібербезпеки та значні обчислювальні вимоги. Значна кількість всесвітньо відомих класифікаційних товариств (Lloyd Register, ABS, DNV GL, NKK та ін.) розробляють вимоги до впровадження технології Digital Twin в свою діяльність. Наближаються часи, коли кожне сучасне судно матиме цифрового двійника.

Недавні дослідження підтверджують ефективність впровадження цифрових двійників [5, 6 та 7].

Agile SE являє собою зміну парадигми від традиційних підходів послідовної розробки до ітеративних, адаптивних методологій. Основні принципи Agile [8] включають інкрементальну розробку, пріоритет взаємодії та адаптацію до змін.

Принципи Agile SE, спочатку розроблені для розробки програмного забезпечення, були успішно адаптовані до складних інженерних систем у різноманітних галузях. Гнучка системна інженерія Agile Systems Engineering (Agile SE) поєднує принципи гнучкості Agile та структурність системної інженерії. Відповідно до INCOSE [3], Agile SE не замінює класичний SE, але розширює його, додаючи ітеративність і швидкий зворотний зв'язок.

Застосування гнучких принципів до складних інженерних систем продемонструвало значні переваги в таких галузях, як аерокосмічна, автомобільна та промислова автоматизація. Ці успіхи служать підставою для розгляду можливості їх використання в суднобудуванні.

Як приклад використання гнучких принципів, можна навести приклад із військового суднобудування – реалізацію проєкту іспанської державної суднобудівної корпорації Navantia F-110 [9]. Це проєкт сучасного фрегата (дивись рис. 2), на етапах проєктування, будівництва та життєвого циклу якого використовуються цифрові двійники. Siemens і Navantia підписали угоду про просування цифрової трансформації до «Верфи 4.0». Це дозволило комплексно впровадити Digital Twin в нову програму [10] фрегатів F-110. Для інтеграції програмного забезпечення та автоматизованих систем управління було застосовано Agile-принципи та Scrum-команди.

Компанія Rolls-Royce просуває ініціативу Intelligent Ship [11], яка використовує цифрові моделі та спринти для розробки автономних суден.

Проєкт Hyundai NHI Smart Shipyard [12] впроваджує PLM (Project Lifecycle Management) і Agile в управління виробничими циклами. Окрім того, Hyundai Heavy Industries оголосила про спільний проєкт із

фінськими компаніями з виробництва морського програмного забезпечення NARA та CADMATIS для прискорення цифрової трансформації суднобудівної галузі [13].



Рис. 2 – Фрегат проекту F-110

Інтеграція класичної спіралі, MBSE та Agile SE формує гібридний підхід, у якому кожен виток спіралі супроводжується цифровими моделями, зворотним зв'язком і швидкою перевіркою гіпотез. Ця «цифрова спіраль» поєднує інженерну ретельність із гнучкістю управління змінами.

Таблиця 1 демонструє особливості різних проєктних підходів.

У галузі суднобудування особливий інтерес мають роботи по зчепленню SE і «спіралі» проєктування судна. Дослідження JMSE/MDPI [14] демонструє концептуальне поєднання V-моделі SE та традиційної моделі в єдину архітектуру. Публікації Design Society [15] підкреслюють важливість ранніх етапів проєктування військового корабля: невизначені вимоги, аморфні процедури та зростаюча складність; пропонується інтегрувати різні методи (спіраль, модель V-модель, Agile, архітектури) у цілісний підхід. Модульність для забезпечення більшої гнучкості одиниць флоту розглядається у звіті RAND [16] і галузевих дослідженнях. Практичні реалізації модульного підходу демонструють проєкти StanFlex [17] і опціональні модулі до патрульних кораблів Австралійського флоту класа Arafura [18].

Викладання основного матеріалу. Аналіз літературних джерел дозволяє описати гібридну методологію як синтез спіралі проєктування (ТСП), Agile SE (модель Agile + MBSE + V-модель) і модульності. У цьому випадку гібридна методологія використовуватиме:

1) ТСП – як доменну карту ітерацій за напрямками проєктування корпусу, потужності головної енергетичної установки, морехідності, конструкції, міцності тощо; в Agile SE спіраль стає «портфоліо експериментів» із зворотними зв'язками;

Таблиця 1

Порівняння проєктних підходів

Параметр	Традиційна спіраль	MBSE	Agile SE	Гібридна структура
Відстежуваність вимог	Обмежена (doc-centric) Трасованість переважно через документи; для наскрізного зв'язку потрібні додаткові RM/SE-артефакти. <i>Джерела: [1], [3], [23]</i>	Висока (model-centric) Зв'язує вимоги з архітектурою/аналізами та V&V у межах системної моделі. <i>Джерела: [24], [23], [19]</i>	Середня (change-centric) Фокус на інкрементах і змінах; рівень формальної трасованості залежить від практик і інструментів. <i>Джерела: [8], [22], [21]</i>	Дуже висока SysML-зв'язки + V-модель = наскрізна «вимоги – V&V»; digital thread/twin підсилює керуваність змін. <i>Джерела: [14], [15], [24], [20]</i>
Адаптивність	Низька Класична спіраль важче масштабується під часті зміни та паралельне виконання стадій. <i>Джерела: [15]</i>	Середня Моделі підтримують impact analysis і керування змінами, але потребують governance та дисципліни моделювання. <i>Джерела: [24], [23]</i>	Висока Responding to change, короткі ітерації, швидкий зворотний зв'язок і переоцінка пріоритетів. <i>Джерела: [8], [22], [21]</i>	Дуже висока Agile cadence + модульність + модельна узгодженість між дисциплінами прискорюють адаптацію. <i>Джерела: [14], [15], [16]</i>
Складність впровадження	Низька Усталений доменний процес у проєктуванні суден; мінімальні організаційні зміни. <i>Джерела: [1], [2]</i>	Середня Потрібні інструменти/репозиторій моделей, навчання та перебудова процесів під model-based підхід. <i>Джерела: [3], [24], [23]</i>	Висока Потребує дисциплінованої інтеграції SE-активностей (архітектура, V&V, CM) з agile-каденцією. <i>Джерела: [22], [21]</i>	Висока Інтеграція кількох методів (SE/спіраль/Agile/MBSE/DT) та єдина toolchain і governance. <i>Джерела: [14], [15]</i>
Вартість впровадження	Середня Витрати здебільшого в інженерних ітераціях і документації; без обов'язкового шару MBSE/DT-інфраструктури. <i>Джерела: [1], [2]</i>	Висока Вартість model toolchain (ліцензії/інтеграції/підтримка) та навчання персоналу. <i>Джерела: [24], [23]</i>	Середня Основні витрати – організаційна трансформація, навчання і координація багатодисциплінарних команд. <i>Джерела: [21]</i>	Висока Сумарна вартість MBSE + digital twin/data + кіберзахист та обчислювальні ресурси. <i>Джерела: [20], [19]</i>
Зрілість технологій	Висока Застосовується десятиліттями у проєктуванні суден; багато усталених практик і кадрів. <i>Джерела: [1], [2]</i>	Середня Усталена рамка в SE-спільноті, але рівень впровадження залежить від організації та зрілості toolchain. <i>Джерела: [3], [24], [23]</i>	Середня Поширюється в SE, але потребує адаптації під домен та регуляторні/якісні вимоги. <i>Джерела: [22], [21]</i>	Зростаюча Інтеграція SE/spiral/Agile у суднобудуванні активно розвивається у публікаціях і кейсах. <i>Джерела: [14], [15], [16]</i>
Підтримка життєвого циклу	Середня Сильніше на стадії дизайну; слабший зв'язок з експлуатаційною петлею даних без цифрової інфраструктури. <i>Джерела: [1], [2]</i>	Висока Підтримує моделювання від концепції до пізніх фаз ЖЦ, V&V та керування змінами. <i>Джерела: [24], [23], [19]</i>	Середня Може охоплювати operations/sustainment, але глибина ЖЦ-підтримки залежить від реалізації. <i>Джерела: [21]</i>	Повна Digital twin формус data feedback loop (monitoring/predictive maintenance) + SE/V&V для підтримки ЖЦ. <i>Джерела: [20], [19]</i>

2) Agile як стратегію управління невизначеністю та цінністю з короткими ітераціями, пріоритезацією ризиків, безперервною перевіркою та демонстрацією системи на рівні архітектурних інкрементів;

3) MBSE як засіб формалізації знань і вимог у моделях SysML, що пов'язують потреби, варіанти використання, функції, архітектуру, інтерфейси та тести; цифровий двійник – як засіб перевірки адекватності рішень.

4) V-модель як основу для наскрізної відстежуваності «вимоги – перевірка / валідація»;

5) Модульність – як архітектурний механізм адаптації до нових умов (опціональні модулі, відкриті інтерфейси, резерви маси / потужності / об'єму), що підтримує еволюційний розвиток і оновлення без радикальних змін конструкції судна.

Реалізація концепції гібридного ТСП / Agile SE / MBSE підходу передбачає наступні етапи:

- Ініціація та архітектурні гіпотези: визначається обсяг завдань (capability епіки) та системні «історії» (user stories); розробляються альтернативні архітектури з інтерфейсами для опціональних модулів;

- Конкурентне прототипування: для ключових ризиків (сумісність модулів, інтеграція БПЛА різних типів, тощо) запускаються паралельні прототипи / макети; результати оперативно вводяться у модель;

- Інтеграційні інкременти: кожні 6–8 тижнів – системні демонстрації (model in the loop, HIL/софт стенди), уточнення вимог і домовленостей з постачальниками / верфями;

- Архітектурні рішення з модульності: закладаються стандартизовані фундаментні місця, роз'єми для підключення живлення та сигнальних кабелів, кріплення, резерв за масою та центруванням; створюються шаблони сертифікаційних випробувань модулів;

- Оновлена спіраль: розрахунки морехідності, міцності, потужності інтегруються з MBSE-архітектурою; кожна ітерація зменшує невизначеність; V-зв'язки забезпечують можливість перевірки вимог.

За результатом від гібридного підходу слід очікувати зниження ризику інтеграції модулів, покращення управління вартісними показниками на етапах розробки та впровадження, дотримання термінів розробки та підвищення адаптивності платформи (судна чи корабля). Перехід до Agile SE у суднобудуванні вимагає змін в управлінні, організаційного впровадження MBSE та Digital Twin, а також дотримання архітектурної дисципліни модульності. Використання модульності має свою ціну – вона вимагає певних об'єму, маси, потужності, використання стандартизованих інтерфейсів, процедур сертифікації та логістики. Рішення повинні прийматися на основі аналізу витрат і гнучкості життєвого циклу та інших параметрів, що стосуються конкретного проекту.

Висновки. Отримані результати підтверджують наступне:

1. Традиційна спіраль Еванса залишається цінною як структурна основа для системного проектування суден.
2. Сучасні цифрові технології (MBSE, PLM, Digital Twin) посилюють спіраль, підвищуючи відстежуваність і адаптивність. Можлива ефективна інтеграція: спіраль проектування корабля та розробку гнучких систем можна успішно інтегрувати для створення більш ефективної методології проектування.
3. Використання Agile SE в суднобудуванні забезпечує швидші ітерації, гнучкість і більшу залученість команд.
4. Гібридний підхід поєднує найкращі аспекти класичного та цифрового проектування, знижуючи ризики та підвищуючи стійкість рішень.
5. Значні покращення продуктивності: інтегровані підходи демонструють суттєве покращення ефективності проектування, задоволеності зацікавлених сторін і результатів проекту.
6. Переваги переважають ризики: хоча інтеграція передбачає певні ризики, потенційні переваги значно переважають ці занепокоєння.
7. Зростання кількості впроваджень в промисловості: провідні суднобудівні підприємства все частіше впроваджують інтегровані підходи з позитивними результатами. Navantia, Rolls-Royce і Hyundai демонструють реальну ефективність інтеграції SE та Agile.
8. В галузі цивільного та транспортного суднобудування в сучасних умовах ефективність гібридного (гнучкого) підходу буде найбільшою для складних комплексних задач на кшталт проектів пасажирських, автопасажирських та швидкісних автопасажирських суден, суден-заводів з переробки газу або нафти, суден для перевезення великогабаритних та великовагових вантажів, багатоцільових рятувальних, суден забезпечення підводних будівельних робіт та інших. В цьому випадку проектувальник та будівельник стикаються із задачею, яка має характер складності близький до складності проектів сучасних військових кораблів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Evans, J.H. Basic Design Concepts. *Journal of the American Society of Naval Engineers*, 1959, Vol. 71 (4), pp. 671–678.
2. Watson, D.G.M. (1998). *Practical Ship Design*. Elsevier Ocean Engineering Book Series. Volume 1. Доступно за посиланням: <https://www.elsevier.com/books/practical-ship-design/watson/978-0-08-042999-1>
3. INCOSE. (2015). *Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*. 4th ed. Wiley, 2015. Доступно за посиланням: <https://www.incose.org/products-and-publications/publications/se-handbook>; <https://download.e-bookshelf.de/download/0003/6422/62/L-G-0003642262-0007580512.pdf>

4. DNV GL. (2022). “Maritime Forecast to 2050. Energy Transition Outlook, 2022”. DNV GL Group Technology & Research. Доступно за посиланням: https://lra.lt/wp-content/uploads/2023/04/DNV_Maritime_Forecast_2050_2022-final.pdf
5. Kunkera, Z., Opetuk, T., Hadzic, N., & Tosanovic, N. (2022). Using Digital Twin in a Shipbuilding Project. *Applied Sciences*, 12 (24), 12721. <https://doi.org/10.3390/app122412721>
6. ScienceDirect (2022). Digital Twin for Ship Life-Cycle: A Critical Systematic Review. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801822027627>
7. ScienceDirect (2024). Digital twins enable shipbuilding. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016824010226>
8. Beck, K., Beedle, M., van Bennekum, A., Cockburn, A., Cunningham, W., Fowler, M., ... & Thomas, D. (2001). “Manifesto for Agile Software Development”. Доступно за посиланням: <https://agilemanifesto.org/>
9. Navantia. F-110 Digital Shipbuilding Programme Report. Madrid, 2021.
10. Siemens reconfirms commitment to Shipbuilding 4.0 with CESENA opening. Доступно за посиланням: <https://news.siemens.com/en-us/siemens-cesena-shipbuilding-xcelerator/>
11. Rolls-Royce. Intelligent Ship Programme: Digital Twin Initiative Report. London, 2020. Доступно за посиланням: <https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/annual-report/2020/2020-full-annual-report.pdf>
12. Hyundai Heavy Industries. Smart Shipyard Initiative. Seoul, 2022. Доступно за посиланням: <https://www.offshore-energy.biz/abs-hd-hyundai-join-forces-on-ai-backed-smart-shipyard-vision/>
13. <https://www.offshore-energy.biz/abs-hd-hyundai-join-forces-on-ai-backed-smart-shipyard-vision/>
14. MDPI JMSE (2024): Systems Engineering for Naval Ship Design Evolution. Доступно за посиланням: <https://www.mdpi.com/2077-1312/12/2/210>
15. Dahlke, Mantwill (DSM 2023): Towards Agile Systems Engineering in Early Stage Design for Complex Naval Vessels. Доступно за посиланням: https://www.designsociety.org/download-publication/46878/towards_agile_systems_engineering_in_early_stage_design_for_complex_naval_vessels
16. RAND (2016): Modularity and Flexibility in Future Ship Designs. Доступно за посиланням: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR696.html
17. Standard Flex 300 The True Multi-role Ship. Доступно за посиланням: <https://www.marinehist.dk/orlogsbib/h/StanFlex.pdf>
18. Australian National Audit Office (ANAO) (2024): Major Projects Report (Arafura-class OPV). Доступно за посиланням: https://www.anao.gov.au/sites/default/files/2024-02/Auditor-General_Report_2023-24_14_pds.pdf
19. Australian National Audit Office (ANAO) (2024): Major Projects Report (Arafura-class OPV). Доступно за посиланням: <https://www.anao.gov.au/>

- sites/default/files/2024-02/Auditor-General_Report_2023-24_14_pdss.pdf
20. NASA. (2016). NASA Systems Engineering Handbook (NASA/SP-2016-6105 Rev2). Доступно за посиланням: https://soma.larc.nasa.gov/lws/pdf_files/12%20NASA_SP-2016-6105%20Rev%202.pdf
 21. ISO. ISO 23247-1:2021 Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 1: Overview and general principles. Доступно за посиланням: <https://www.iso.org/standard/75066.html>
 22. MITRE. Agile Systems Engineering. Доступно за посиланням: <https://aida.mitre.org/agile/agile-systems-engineering/>
 23. SEBoK. Agile Systems Engineering. Доступно за посиланням: https://sebokwiki.org/wiki/Agile_Systems_Engineering
 24. SEBoK. Model-Based Systems Engineering (MBSE). Доступно за посиланням: https://sebokwiki.org/wiki/Model-Based_Systems_Engineering_%28MBSE%29
 25. INCOSE. (2015). MBSE Overview. Доступно за посиланням: <https://www.incose.org/docs/default-source/delaware-valley/mbse-overview-incose-30-july-2015.pdf>

REFERENCES

1. Evans, J.H. Basic Design Concepts. *Journal of the American Society of Naval Engineers*, 1959, Vol. 71 (4), pp. 671–678.
2. Watson, D.G.M. (1998). Practical Ship Design. Elsevier Ocean Engineering Book Series. Volume 1. Available at: <https://www.elsevier.com/books/practical-ship-design/watson/978-0-08-042999-1>
3. INCOSE. (2015). Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities. 4th ed. Wiley, 2015. Available at: <https://www.incose.org/products-and-publications/publications/se-handbook> <https://download.e-bookshelf.de/download/0003/6422/62/L-G-0003642262-0007580512.pdf>
4. DNV GL. (2022). “Maritime Forecast to 2050. Energy Transition Outlook, 2022”. DNV GL Group Technology & Research. Available at: https://l1sra.lt/wp-content/uploads/2023/04/DNV_Maritime_Forecast_2050_2022-final.pdf
5. Kunkera, Z., Opetuk, T., Hadzic, N., & Tosanovic, N. (2022). Using Digital Twin in a Shipbuilding Project. *Applied Sciences*, 12 (24), 12721. <https://doi.org/10.3390/app122412721>
6. ScienceDirect (2022). Digital Twin for Ship Life-Cycle: A Critical Systematic Review. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801822027627>
7. ScienceDirect (2024). Digital twins enable shipbuilding. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016824010226>
8. Beck, K., Beedle, M., van Bennekum, A., Cockburn, A., Cunningham, W., Fowler, M., ... & Thomas, D. (2001). “Manifesto for Agile Software Development”. Available at: <https://agilemanifesto.org/>

9. Navantia. F-110 Digital Shipbuilding Programme Report. Madrid, 2021.
10. Siemens reconfirms commitment to Shipbuilding 4.0 with CESENA opening. Available at: <https://news.siemens.com/en-us/siemens-cesena-shipbuilding-xcelerator/>
11. Rolls-Royce. Intelligent Ship Programme: Digital Twin Initiative Report. London, 2020. Available at: https://www.rolls-royce.com/~/_media/Files/R/Rolls-Royce/documents/annual-report/2020/2020-full-annual-report.pdf
12. Hyundai Heavy Industries. Smart Shipyard Initiative. Seoul, 2022. Available at: <https://www.offshore-energy.biz/abs-hd-hyundai-join-forces-on-ai-backed-smart-shipyard-vision/>
13. <https://www.offshore-energy.biz/abs-hd-hyundai-join-forces-on-ai-backed-smart-shipyard-vision/>
14. MDPI JMSE (2024): Systems Engineering for Naval Ship Design Evolution. Available at: <https://www.mdpi.com/2077-1312/12/2/210>
15. Dahlke, Mantwill (DSM 2023): Towards Agile Systems Engineering in Early Stage Design for Complex Naval Vessels. Available at: https://www.designsociety.org/download-publication/46878/towards_agile_systems_engineering_in_early_stage_design_for_complex_navial_vessels
16. RAND (2016): Modularity and Flexibility in Future Ship Designs. Available at: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR696.html
17. Standard Flex 300 The True Multi-role Ship. Available at: <https://www.marinehist.dk/orlogsbib/h/StanFlex.pdf>
18. Australian National Audit Office (ANAO) (2024): Major Projects Report (Arafura-class OPV). Available at: https://www.anao.gov.au/sites/default/files/2024-02/Auditor-General_Report_2023-24_14_pdss.pdf
19. NASA. (2016). NASA Systems Engineering Handbook (NASA/SP-2016-6105 Rev2). Available at: https://soma.larc.nasa.gov/lws/pdf_files/12%20NASA_SP-2016-6105%20Rev%202.pdf
20. ISO. ISO 23247-1:2021 Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 1: Overview and general principles. Available at: <https://www.iso.org/standard/75066.html>
21. MITRE. Agile Systems Engineering. Available at: <https://aida.mitre.org/agile/agile-systems-engineering/>
22. SEBoK. Agile Systems Engineering. Available at: https://sebokwiki.org/wiki/Agile_Systems_Engineering
23. SEBoK. Model-Based Systems Engineering (MBSE). Available at: https://sebokwiki.org/wiki/Model-Based_Systems_Engineering_%28MBSE%29
24. INCOSE. (2015). MBSE Overview. Available at: <https://www.incose.org/docs/default-source/delaware-valley/mbse-overview-incose-30-july-2015.pdf>

Дата першого надходження статті до видання: 26.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

ПОРІВНЯЛЬНИЙ СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ БІЗНЕС-СЕРЕДОВИЩА
КРАЇН ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ ТА УКРАЇНИ
(НА ПРИКЛАДІ ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ)

М.О. Хобта¹, В.М. Сукманюк², М.К. Матвєєва³

¹к. е. н., доцент кафедри менеджменту,

Національний транспортний університет, Київ, Україна

ORCID ID: 0000-0002-6505-9092

²асистент кафедри менеджменту,

Національний транспортний університет, Київ, Україна

ORCID ID: 0000-0003-4202-8960

Здобувачка першого (бакалаврського) рівня вищої освіти,
спеціальність ДЗ «Менеджмент»,

Національний транспортний університет, Київ, Україна

ORCID ID: 0009-0007-9360-2527

Анотація

Вступ. Транспортна система є ключовим чинником економічної інтеграції України до Європейського Союзу та забезпечення стійкості національної економіки в умовах воєнних викликів. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю порівняльної оцінки транспортного бізнес-середовища України та країн ЄС з метою виявлення структурних відмінностей, проблем функціонування та перспектив розвитку. **Мета.** Метою статті є здійснення порівняльного статистичного аналізу транспортного бізнес-середовища України та країн Європейського Союзу з метою виявлення ключових відмінностей, проблем і перспектив розвитку в умовах європейської інтеграції та воєнних дій. **Результати.** Дослідження базується на офіційних даних Євростату, Укрстату, Світового банку та аналітичних звітах Європейської Комісії. Проаналізовано структуру вантажообігу за видами транспорту, стан транспортної інфраструктури, рівень контейнеризації та цифровізації логістичних процесів, а також особливості регуляторного середовища України та ЄС. Встановлено, що транспортна система України характеризується високою залежністю від залізничних перевезень і насипних вантажів, тоді як у країнах ЄС домінує диверсифікована модель із переважанням автомобільного транспорту та широким застосуванням мультимодальних перевезень. Виявлено вплив воєнних дій на трансформацію логістичних маршрутів, скорочення ролі морського транспорту та зростання значення автомобільних перевезень і «Смуг солідарності» у забезпеченні зовнішньої торгівлі України з ЄС. Визначено суттєвий розрив між Україною та країнами ЄС за показниками якості інфраструктури, ефективності логістики та рівня цифровізації, попри позитивні зрушення у впровадженні електронних сервісів. **Висновки.** Обґрунтовано стратегічні напрями підвищення конкурентоспроможності транспортної системи України, зокрема модернізацію транспортної інфраструктури, розвиток інтермодальних перевезень, поглиблення цифровізації



логістичних процесів і гармонізацію регуляторного середовища відповідно до стандартів Європейського Союзу. Отримані результати можуть бути використані у формуванні державної транспортної політики, плануванні післявоєнного відновлення інфраструктури та обґрунтуванні інвестиційних рішень у сфері транспорту й логістики.

Ключові слова: транспортне бізнес-середовище, транспортна система України, статистичний аналіз, вантажообіг, логістика, мультимодальні перевезення, цифровізація транспорту, конкурентоспроможність, європейська інтеграція, країни ЄС, воєнні виклики.

COMPARATIVE STATISTICAL ANALYSIS OF THE BUSINESS ENVIRONMENT OF THE EUROPEAN UNION AND UKRAINE (USING THE EXAMPLE OF THE TRANSPORT INDUSTRY)

M. O. Khobta¹, V.M. Sukmaniuk², M.K. Matveeva³

¹Ph.D. Economics, Associate Professor of Department of Management,
National Transport University, Kyiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-6505-9092

²Assistant of Department of Management,
National Transport University, Kyiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-4202-8960

³Bachelor's Degree Student in the specialty D3 "Management",
National Transport University, Kyiv, Ukraine
ORCID ID: 0009-0007-9360-2527

Summary

Introduction. The transport system is a key factor in Ukraine's economic integration into the European Union and ensuring the stability of the national economy in the face of military challenges. The relevance of the study is due to the need for a comparative assessment of the transport business environment of Ukraine and the EU countries in order to identify structural differences, problems of functioning and development prospects. **Purpose.** The purpose of the article is to conduct a comparative statistical analysis of the transport business environment of Ukraine and the European Union countries in order to identify key differences, problems and development prospects in the context of European integration and military operations. **Results.** The study is based on official data from Eurostat, Ukrstat, the World Bank and analytical reports of the European Commission. The structure of cargo turnover by mode of transport, the state of transport infrastructure, the level of containerization and digitalization of logistics processes, as well as the features of the regulatory environment of Ukraine and the EU are analyzed. It was found that the transport system of Ukraine is characterized by a high dependence on rail transport and bulk cargo, while in the EU countries a diversified model with a predominance of road transport and wide use of multimodal transportation dominates. The impact of military operations on the transformation of logistics routes, the reduction of the role of sea transport and the growth of the importance of road transport and the "Solidarity Strip" in ensuring Ukraine's foreign trade with the EU was revealed. A significant gap was identified between Ukraine and the EU countries in terms of infrastructure quality, logistics efficiency and the level of digitalization, despite

*positive developments in the implementation of electronic services. **Conclusions.** Strategic directions for increasing the competitiveness of the transport system of Ukraine are substantiated, in particular, the modernization of transport infrastructure, the development of intermodal transportation, the deepening of the digitalization of logistics processes and the harmonization of the regulatory environment in accordance with the standards of the European Union. The results obtained can be used in the formation of state transport policy, planning post-war infrastructure restoration, and substantiating investment decisions in the field of transport and logistics.*

Key words: *transport business environment, transport system of Ukraine, statistical analysis, cargo turnover, logistics, multimodal transportation, digitalization of transport, competitiveness, European integration, countries EU, military challenges.*

Вступ. Транспортна галузь відіграє важливу роль у забезпеченні сталого розвитку національної економіки, оскільки безпосередньо впливає на ефективність виробництва, зовнішньоекономічні зв'язки та мобільність товарних потоків. Рівень розвитку транспортного бізнес-середовища значною мірою визначає конкурентоспроможність держави на міжнародному ринку та її здатність інтегруватися до глобальних і регіональних економічних систем. Для України питання розвитку транспорту набуло особливої актуальності в умовах європейської інтеграції та тривалого воєнного протистояння. Отримання статусу кандидата на вступ до Європейського Союзу зумовлює необхідність адаптації національної транспортної системи до європейських стандартів, тоді як війна призвела до значних втрат інфраструктури та вимушеної переорієнтації логістичних маршрутів. Обмеження морських перевезень, зростання ролі автомобільного транспорту та запровадження «Смуг солідарності» суттєво змінили умови функціонування транспортного бізнесу в Україні. На відміну від України, транспортний ринок Європейського Союзу характеризується високим рівнем стабільності, розвиненою інфраструктурою та активним впровадженням цифрових і екологічно орієнтованих рішень. Порівняння транспортного бізнес-середовища України та ЄС дозволяє виявити наявні структурні диспропорції, оцінити масштаби відставання за окремими показниками та визначити напрями, за якими доцільно зосередити зусилля в процесі реформування галузі. У зв'язку з цим проведення порівняльного статистичного аналізу ключових показників розвитку транспортної сфери України та країн ЄС є необхідним для формування практичних рекомендацій щодо підвищення ефективності та конкурентоспроможності вітчизняної транспортної системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні тенденції в ЄС свідчать про перехід до мультимодальних перевезень та «зеленої» логістики. Україна, своєю чергою, демонструє високу адаптивність у кризових умовах, проте суттєво відстає за показниками інфраструктурної якості та цифровізації процесів. Проблеми розвитку транспортної галузі та формування конкурентоспроможного транспортного бізнес-середовища широко висвітлюються у працях вітчизняних і зарубіжних науковців, а також у звітах міжнародних організацій. У працях вітчизняних науковців проблема розвитку транспортної галузі розглядається через призму структурного аналізу, оцінки інституційних обмежень та впливу зовнішніх чинників. Так, О. Ложачевська [1] у своїй монографії детально аналізує інноваційний

розвиток транспортного комплексу України, зокрема проблеми конкурентоспроможності транспортних підприємств у контексті посилення екологічних вимог та переходу до сталого розвитку, підкреслюючи роль «зеленої» логістики та інтеграції екологічних пріоритетів у стратегії галузі. У свою чергу, С. Ільченко [2] досліджує нормативно-правові засади екологічної трансформації транспортного сектору України, оцінюючи прогалини в законодавстві та необхідність гармонізації з європейськими стандартами для формування конкурентоспроможної та сталої логістики. С. Teslean [3] аналізує вплив якості транспортних мереж на економічну конкурентоспроможність країн Європейського Союзу.

У дослідженнях Європейської Комісії [4], Євростату [5] та Світового банку [6] значна увага приділяється структурі вантажообігу, ефективності логістики, розвитку мультимодальних перевезень і переходу до «зеленої» транспортної моделі в країнах Європейського Союзу. Аналітичні матеріали World Economic Forum [7] та Logistics Performance Index [6] використовуються для оцінки інституційної якості, інфраструктурного забезпечення та рівня цифровізації транспортних систем.

Водночас українські наукові публікації переважно зосереджені на аналізі окремих видів транспорту, проблемах функціонування залізничної або автомобільної галузі, а також на оцінці наслідків воєнних дій для транспортної інфраструктури. У звітах Світового банку (RDNA3 [8], RDNA4 [9]) та матеріалах Міністерства відновлення України [10] детально розглядаються масштаби пошкоджень інфраструктури та потреби у фінансуванні відновлення. Разом із тим порівняльні дослідження, які б системно зіставляли транспортне бізнес-середовище України та країн ЄС на основі офіційної статистики, залишаються обмеженими.

Недостатньо дослідженим є також вплив воєнних викликів на трансформацію логістичних маршрутів, зміну ролі окремих видів транспорту та адаптацію бізнес-середовища України до європейських регуляторних і технологічних стандартів. Це зумовлює актуальність даного дослідження та необхідність комплексного порівняльного статистичного аналізу транспортної галузі України й країн Європейського Союзу.

Постановка проблеми. Транспортне бізнес-середовище є одним із базових елементів функціонування національної економіки, оскільки забезпечує переміщення товарних потоків, інтеграцію у міжнародні ринки та формування конкурентних переваг держави. В умовах європейської інтеграції України та триваючих воєнних дій питання ефективності транспортної системи набуло стратегічного значення. З одного боку, Україна декларує курс на гармонізацію транспортної політики зі стандартами Європейського Союзу, розвиток мультимодальних перевезень та цифрових логістичних рішень. З іншого боку, повномасштабна війна спричинила суттєві втрати транспортної інфраструктури, обмеження морських перевезень, перевантаження прикордонної інфраструктури та зростання логістичних витрат.

Найвний розрив між Україною та країнами ЄС за показниками якості інфраструктури, ефективності логістики, рівня контейнеризації та цифровізації створює системні бар'єри для підвищення конкурентоспроможності національного транспортного бізнесу. Водночас відсутність комплексної порівняльної статистичної

оцінки транспортного бізнес-середовища України та Європейського Союзу ускладнює формування обґрунтованих управлінських і регуляторних рішень. У зв'язку з цим виникає необхідність проведення порівняльного статистичного аналізу ключових показників розвитку транспортної галузі України та країн ЄС з метою виявлення структурних диспропорцій, оцінки впливу воєнних викликів і визначення пріоритетних напрямів підвищення конкурентоспроможності транспортної системи України.

Формування цілей статті. Стаття спрямована на порівняльний статистичний аналіз транспортного бізнес-середовища України та країн Європейського Союзу з метою виявлення структурних диспропорцій, оцінки відставання за ключовими показниками та визначення пріоритетних напрямів підвищення конкурентоспроможності національної транспортної системи. Дослідження охоплює аналіз структури вантажообігу, оцінку стану інфраструктури, рівня контейнеризації та цифровізації логістичних процесів, а також вивчення особливостей регуляторного середовища і формування практичних рекомендацій щодо модернізації транспортної системи та гармонізації її з європейськими стандартами.

Виклад основного матеріалу. В Україні традиційно найбільшу частку вантажообігу забезпечує залізничний транспорт, що зумовлено необхідністю перевезення масових вантажів, зокрема зерна, руди та металопродукції, на значні відстані. У кризові періоди саме залізниця залишається ключовим елементом логістичної системи, формуючи близько 50–60 % загального обсягу вантажних перевезень.

У країнах Європейського Союзу структура вантажообігу є більш диверсифікованою. Основну роль у внутрішніх наземних перевезеннях відіграє автомобільний транспорт, частка якого перевищує 75 %, тоді як залізничні перевезення становлять у середньому 17–18 %. Така модель пояснюється високою щільністю дорожньої мережі, розвиненою інфраструктурою та активним використанням мультимодальних логістичних рішень. Польща залишається одним із лідерів у сфері автомобільних перевезень у межах ЄС, забезпечуючи значну частку міжнародних транспортних операцій, хоча у 2024 році спостерігалось незначне скорочення автопарку внаслідок зростання конкуренції з боку інших країн Центральної та Східної Європи [11].

На рисунку 1 показано порівняння структури вантажообігу за видами транспорту в Україні та ЄС, де чітко видно домінування залізничних перевезень в Україні та більш збалансоване поєднання автомобільного і водного транспорту в країнах ЄС.

Значний вплив на формування транспортного бізнес-середовища має географічний чинник та доступ до морських шляхів. За даними Eurostat, морський транспорт у 2023 р. забезпечував близько 67,4 % вантажообігу в ЄС за тонно-кілометрами, що є найбільшою часткою серед режимів транспорту [12]. Крім того, у 2024 р. при експорті та імпорті товарів за межі ЄС морські перевезення становили понад 70 % фізичного обсягу торгівлі за вагою [13]. В Україні до початку повномасштабного вторгнення морські порти також були ключовим елементом експортної логістики, однак у структурі внутрішнього вантажообігу їхня частка традиційно поступалася наземним видам транспорту.

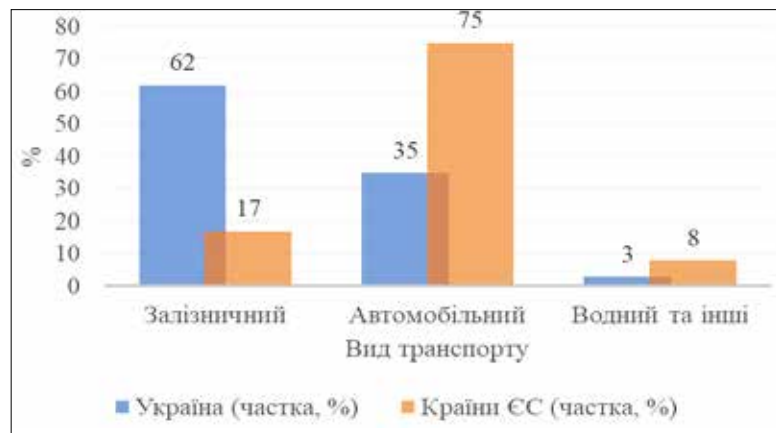


Рис. 1. Порівняння структури вантажообігу за видами транспорту в Україні та ЄС [11]

Воєнні дії суттєво знизили ефективність функціонування морської інфраструктури України та призвели до різкого скорочення обсягів перевезень. У результаті національна транспортна система характеризується високою залежністю від залізничного транспорту, тоді як у ЄС спостерігається збалансоване поєднання автомобільних, залізничних і морських перевезень. За таких умов для України ключового значення набуває забезпечення стійкості та безперервності логістичних процесів шляхом адаптації транспортних маршрутів і механізмів перевезень до наявних безпекових та інфраструктурних обмежень.

Транспортний ринок ЄС характеризується стабільністю та переходом до «зеленої» логістики, тоді як сектор України перебуває у стані «вимушеної трансформації» через триваючу війну та перехід від морських до сухопутних маршрутів. Автомобільні перевезення в Україні з 2022 року докорінно змінили бізнес-середовище, тому до кінця 2024 року майже 80 % українського імпорту та 73 % несільськогосподарського експорту перевозилося автомобільним транспортом [14]. Важливим чинником розвитку міжнародних перевезень також стало впровадження транспортного безвізу з ЄС, який, за оцінками українських підприємств, значно спростив доступ до європейського ринку та зменшив адміністративні бар'єри. На рисунку 2 наведено динаміку торгівлі товарами між Україною та країнами ЄС, що ілюструє зміни імпорту, експорту та торгового балансу у період 2021–2025 років.

У третьому кварталі 2025 року порівняно з попереднім кварталом зменшилися як імпорт до ЄС з України (-5,8 %), так і експорт ЄС до України (-5,3 %), також частка України в експорті до країн поза ЄС зросла з 1,3 % у третьому кварталі 2021 року до 1,7 % у третьому кварталі 2025 року, а частка України в імпорті до країн поза ЄС зменшилася з 1,3 % у третьому кварталі 2021 року до 0,8 % у третьому кварталі 2025 року [15].

Мультимодальна транспортна інфраструктура формує основу просторової цілісності економіки та визначає здатність держави забезпечувати безперервність вантажних і пасажирських потоків. За умов воєнних викликів її функціонування істотно ускладнюється через втрату ключових інфраструктурних елементів, зокрема шляхів сполучення, інженерних споруд та об'єктів транспортної логістики.

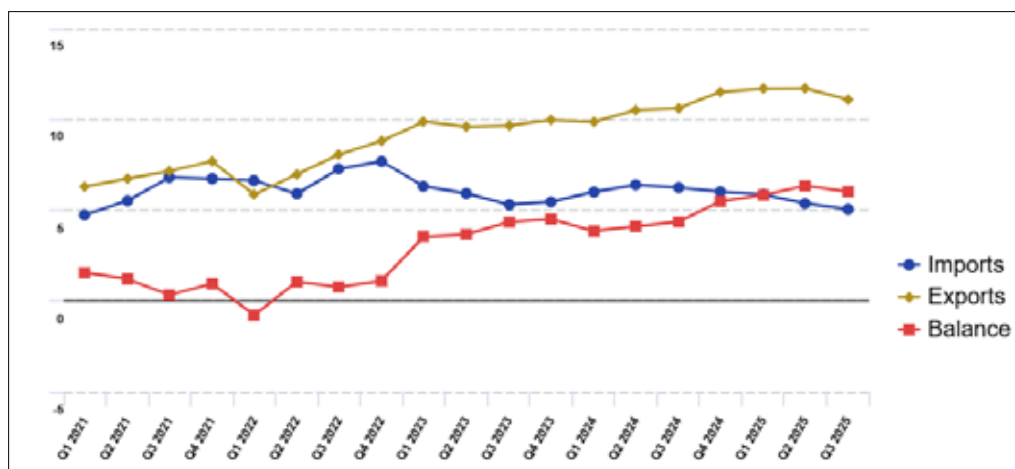


Рис. 2. Торгівля товарами ЄС з Україною [15]

Такі деструктивні процеси порушують сталі системи постачання, обмежують доступ до критично важливих ресурсів і знижують адаптивність національної економіки. Водночас післявоєнна реконструкція транспортної системи потребує концентрації фінансових, інституційних і часових ресурсів, що об'єктивно впливає на динаміку економічного відновлення та довгострокову конкурентоспроможність країни.

Транспортне бізнес-середовище визначається не лише обсягами перевезень, а й умовами здійснення господарської діяльності, рівнем регуляторної прозорості та цифровізації процесів. Між Україною та Європейським Союзом у цій сфері зберігається суттєвий розрив. Ринок транспортних послуг ЄС характеризується стабільністю, високим рівнем регулювання та орієнтацією на сталий розвиток, зокрема через пріоритетність екологічних і мультимодальних перевезень.

В Україні, незважаючи на проведені реформи, залишаються численні системні проблеми, серед яких відставання законодавчої бази та концентрація контролю в окремих сегментах ринку. Станом на 2024 рік виконання зобов'язань в транспортній сфері, передбачених Угодою про асоціацію між Україною та Європейським Союзом, було на рівні приблизно 58 %, що свідчить про значне відставання цієї галузі у процесі імплементації європейського правового поля. При цьому загальний рівень виконання Угоди за всіма напрямками становив близько 81 %, що підкреслює більш повільний прогрес саме в транспортному секторі [16].

Водночас, незважаючи на складні умови воєнного часу, інвестиційні настрої у галузі залишаються відносно позитивними, оскільки більшість транспортних компаній планують вкладення в модернізацію та розвиток інфраструктури. Для наочного порівняння ефективності транспортного бізнес-середовища України та країн ЄС у 2024–2025 роках наведено ключові статистичні показники [6, 17] в таблиці 1.

Аналізуючи конкурентоспроможність України у сфері транспорту, згідно зі Звітом Європейської Комісії про розширення за 2025 рік [18], позиція України є поєднанням стратегічних переваг та глибоких структурних перешкод.

Таблиця 1

**Порівняння ключових показників транспортного бізнес-середовища
України та країн ЄС, 2024–2025 рр.**

Індикатор	Україна	ЄС	Ключова різниця
Індекс ефективності логістики (LPI)	2.8/5.0	3.8-4.2/5.0	Значний розрив ефективності логістики
Рівень залізничної контейнеризації	2-3 %	21 %	Україна залежить від насипних вантажів; ЄС використовує інтермодальні перевезення
Частка торгівлі з ЄС	53.6 % від загального обсягу торгівлі	Приблизно 60 %	Висока залежність від ринку ЄС
Оцінка якості інфраструктури	Низький (пошкодження війною)	Високий (сучасна/зелена)	Потреба України у сотнях мільярдів доларів США на реконструкцію
Цифровізація	зростає	Високий (повністю електронна логістика)	Україна є лідером у спеціалізованих інструментах (eQueue)

Сильними сторонами є розгалужена мережа автомагістралей, досвідчені міжнародні перевізники, конкурентні витрати на послуги та стратегічне розташування як транзитного вузла між ЄС та Азією. Слабкими сторонами є пошкоджена війною інфраструктура, невідповідність ширини залізничних колій (1520 мм проти 1435 мм), низький рівень інтермодальних перевезень та хронічна нестача кваліфікованих водіїв. Можливості для України полягають у інтеграції до TEN-T (Транс'європейської транспортної мережі), ініціативи «Смути солідарності» (EU-Ukraine Solidarity Lanes) [19], а також у понад €1,55 млрд запланованого фінансування через Connecting Europe Facility (CEF) для покращення транспортних сполучень [20]. При цьому зберігаються суттєві загрози для національної транспортної системи, серед яких продовження військових нападів на логістичні вузли, вузькі місця на кордоні, високі страхові внески через воєнні ризики та жорстка конкуренція з боку польського та балтійського флотів.

Для підвищення конкурентоспроможності транспортної системи України доцільно зосередити увагу на чотирьох ключових стратегічних напрямках: модернізації інфраструктури та інтеграції залізничної колії, розвитку інтермодальних терміналів, поглибленні цифровізації та забезпеченні прозорості процесів, а також удосконаленні регуляторного середовища. У межах модернізації інфраструктури та інтеграції колії пріоритетного значення набуває розширення так званої «євроколії», тобто будівництво залізничних ліній стандарту 1435 мм від західного кордону до ключових внутрішніх транспортних вузлів, зокрема Львова, Києва та Одеси. Реалізація цього напрямку дозволить усунути потребу в трудомісткій та затратній процедурі заміни візків, скоротити час проходження кордону та зменшити логістичні витрати перевізників. Крім того, інтеграція української залізничної інфраструктури зі стандартами ЄС сприятиме зростанню обсягів транзитних перевезень, підвищенню привабливості України для міжнародних логістичних операторів та прискоренню її включення до Трансєвропейської транспортної мережі (TEN-T), що є важливою умовою поглиблення економічної інтеграції

з Європейським Союзом. У інтермодальних терміналах потрібне стимулювання будівництва сухих портів та контейнерних терміналів, адже збільшення рівня контейнеризації з 2 % до 15 % є важливим для високоцінних товарів. Цифровізація та прозорість спонукає до створення єдиного центру транспортних даних, адже відповідно до урядової ініціативи 2025 року, Україна повинна повністю впровадити центр транспортних даних, щоб зменшити корупційні ризики та забезпечити планування маршрутів на основі даних, також перехід на повністю електронні накладні (e-CMR) скоротить час очікування на кордоні приблизно на 25 % та узгодить його зі стандартами цифрової логістики ЄС. У регуляторній реформі (узгодження з ЄС) відбуватиметься лібералізація ринку залізничних перевезень, тобто прийняття «Закону про залізничний транспорт» для дозволу на приватну тягу. Подолання державної монополії є найважливішим кроком для залучення приватних інвестицій у локомотиви та вагони.

Висновки. Проведене порівняльне дослідження транспортного бізнес-середовища України та країн Європейського Союзу дозволяє чітко окреслити як стратегічні переваги, так і системні обмеження національної транспортної системи. Українська транспортна галузь демонструє високу адаптивність до кризових умов, що проявляється у здатності швидко переорієнтувати логістичні маршрути, збільшувати роль автомобільних перевезень та забезпечувати функціонування зовнішньоекономічних зв'язків навіть за умов значних руйнувань інфраструктури. Водночас, глибокі структурні диспропорції – домінування залізничних перевезень, низький рівень контейнеризації, обмежена інтеграція мультимодальних ланцюгів, невисокий рівень цифровізації та законодавчі бар'єри – істотно обмежують конкурентоспроможність України на міжнародному транспортному ринку. Порівняння з країнами ЄС засвідчує, що ефективність логістики та стабільність транспортного бізнес-середовища визначаються не лише технічною оснащеністю інфраструктури, а й із високим рівнем цифровізації процесів, гармонізованим регуляторним середовищем та широким впровадженням мультимодальних рішень. Статистичний аналіз показав, що Україна відстає від середнього рівня ЄС за індексом логістичної ефективності LPI на 1,0–1,5 бала, а залізничні перевезення формують більшість вантажопотоків. Для підвищення конкурентоспроможності транспортної галузі необхідно:

1. Модернізувати інфраструктуру та мультимодальні вузли;
2. Впроваджувати цифрові системи управління логістикою;
3. Гармонізувати регуляторне середовище відповідно до європейських стандартів.

Аналіз торгових потоків, інфраструктурних показників та логістичних індексів свідчить про нагальну потребу України у комплексній модернізації транспортної системи. У пріоритеті залишається розвиток інтермодальних терміналів та «євроколії», що забезпечить інтеграцію української залізниці зі стандартами ЄС і зменшить витрати часу та ресурсів на транзитні перевезення. Розширення контейнеризації та розвиток сухопортів сприятимуть більш ефективній обробці високоартісних вантажів і підвищенню гнучкості логістичних маршрутів. Водночас цифровізація та впровадження єдиного центру транспортних даних, електронних накладних і прозорих процедур контролю створюють основу для зниження

корупційних ризиків, оптимізації маршрутного планування та узгодження процесів із європейськими стандартами.

Не менш важливою є гармонізація регуляторного середовища та лібералізація залізничного ринку, що відкриває можливості для залучення приватних інвестицій і стимулює конкуренцію серед перевізників. Поглиблення інтеграції до TEN-T, реалізація ініціативи «Смути солідарності» та використання фінансування ЄС у рамках CEF створюють потенціал для зміцнення позицій України як транзитного вузла між Європою та Азією.

Таким чином, підвищення конкурентоспроможності транспортного бізнес-середовища України вимагає одночасного вирішення технологічних, інфраструктурних, цифрових та регуляторних завдань. Втілення цих стратегічних напрямів сприятиме подоланню структурних дисбалансів, зменшенню логістичних витрат, підвищенню ефективності міжнародної торгівлі та прискоренню інтеграції України у європейський транспортний простір, що, у свою чергу, створює основу для сталого економічного розвитку та зміцнення національної конкурентоспроможності в умовах післявоєнного відновлення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ложачевська О.М. Інноваційний розвиток транспортного комплексу : монографія / за загальною редакцією проф. О.М. Ложачевської. Київ : Міленіум, 2021. 210 с. ISBN 978-966-8063-77-4
2. Никифорок О., Ільченко С. Правові засади екологічної трансформації транспортного сектору України в контексті євроінтеграції. *Economics and Law*. 2025. № 77 (2), С. 85–100. DOI: <https://doi.org/10.15407/econlaw.2025.02.085>
3. Cezar TECLEAN. The impact of the quality of transport networks on economic competitiveness in the European Union, CES Working Papers, Centre for European Studies, Alexandru Ioan Cuza University, 2022. vol. 14 (2), pages 114–132. URL: <https://ideas.repec.org/a/jes/wpaper/y2022v14i2p114-132.html>
4. Logistics and multimodal transport. European Commission. URL: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/logistics-and-multimodal-transport_en (дата звернення: 11.01.2026).
5. Road Freight Transport in 2024. Eurostat. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20250709-1?utm_source (дата звернення: 11.01.2026).
6. Logistics Performance Index (LPI). THE WORLD BANK. URL: <https://lpi.worldbank.org/> (дата звернення: 11.01.2026).
7. World Economic Forum. Green Logistics Innovation for Emerging Markets: Driving Competitiveness and Shared Value. URL: https://reports.weforum.org/docs/WEF_Green_Logistics_Innovation_for_Emerging_Markets_Driving_Competitiveness_and_Shared_Value_2025.pdf?utm_source (дата звернення: 11.01.2026).
8. Updated Ukraine Recovery and Reconstruction Needs Assessment Released : пресреліз Світового банку від 15.02.2024 р. (RDNA3)

- World Bank. URL: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2024/02/15/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment-released> (дата звернення: 21.01.2026).
9. Updated Ukraine Recovery and Reconstruction Needs Assessment Released : пресреліз Світового банку від 25.02.2025 р. (RDNA4) World Bank. URL: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2025/02/25/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment-released> (дата звернення: 21.01.2026).
 10. Пріоритети відновлення України на 2025 рік: основні показники та тези звіту RDNA4 : Міністерство розвитку громад та територій України. URL: <https://mindev.gov.ua/news/priorytety-vidnovlennia-ukrainy-na-2025-osnovni-pokaznyky-ta-tezy-zvitu-rdna4> (дата звернення: 21.01.2026).
 11. Statistics Explained. Eurostat. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Category:Transport> (дата звернення: 22.01.2026).
 12. Most goods transported by sea within the EU in 2023. Eurostat. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20250416-1?utm_source (дата звернення: 22.01.2026).
 13. Maritime transport dominates international trade. Eurostat. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/edn-20250925-1?utm_source (дата звернення: 22.01.2026).
 14. Solidarity Lanes: Latest figures – August 2024. European Commission. URL: https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/solidarity-lanes-latest-figures-august-2024-2024-09-20_en?utm_source (дата звернення: 22.01.2026).
 15. EU trade with Ukraine – latest developments. Eurostat. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=EU_trade_with_Ukraine_-_latest_developments (дата звернення: 23.01.2026).
 16. Звіти про виконання Угоди про асоціацію між Україною та ЄС. Урядовий портал. URL: <https://www.kmu.gov.ua/diyalnist/yevropejska-integraciya/vikonannya-ugodi-pro-asociaciyu/zviti-pro-vikonannya-ugodi-pro-asociaciyu> (дата звернення: 23.01.2026).
 17. Bulletin of Ukraine – EU trade relations, 2024. Ministry of Economy. URL: <https://me.gov.ua/Documents/Detail/a6ad9cff-feae-429c-93d6-68dc618435f9?lang=en-GB> (дата звернення: 23.01.2026).
 18. Ukraine Report 2025. Enlargement Package. European Commission. URL: https://enlargement.ec.europa.eu/ukraine-report-2025_sl (дата звернення: 23.01.2026).
 19. EU-Ukraine Solidarity Lanes. European Commission. URL: https://commission.europa.eu/topics/eu-solidarity-ukraine/eu-assistance-ukraine/eu-ukraine-solidarity-lanes_en (дата звернення: 24.01.2026).
 20. EU funding for better transport connections. European Commission. URL: https://transport.ec.europa.eu/ukraine/eu-ukraine-solidarity-lanes/eu-funding-better-transport-connections_en?utm_source (дата звернення: 24.01.2026).

REFERENCES

1. Lozhachevska, O.M. (Ed.). (2021). Innovative development of the transport complex [Innovatsiyni rozvytok transportnoho kompleksu]. Kyiv: Millennium. ISBN 978-966-8063-77-4.
2. Nykyforuk, O., Ilchenko, S. (2025). Legal foundations of the environmental transformation of Ukraine's transport sector in the context of European integration [Pravovi zasady ekolohichnoyi transformatsiyi transportnoho sektoru Ukrayiny v konteksti yevrointehratsiyi]. *Economics and Law*, 2 (77), 85–100. <https://doi.org/10.15407/econlaw.2025.02.085> [in Ukrainian].
3. Cezar TECLEAN, 2022. The impact of the quality of transport networks on economic competitiveness in the European Union, CES Working Papers, Centre for European Studies, Alexandru Ioan Cuza University, vol. 14 (2), pages 114-132, November.
4. Logistics and multimodal transport. European Commission [Official website of the European Commission]. [transport.ec.europa.eu](https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/logistics-and-multimodal-transport_en). Retrieved January 11, 2026 from https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/logistics-and-multimodal-transport_en
5. Road Freight Transport in 2024. Eurostat [Official website of Eurostat]. [ec.europa.eu](https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20250709-1). Retrieved January 11, 2026 from <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20250709-1>
6. Logistics Performance Index (LPI). World Bank [Official website of the World Bank]. lpi.worldbank.org. Retrieved January 11, 2026 from <https://lpi.worldbank.org/>
7. Green Logistics Innovation for Emerging Markets: Driving Competitiveness and Shared Value. World Economic Forum [Official website of the World Economic Forum]. [weforum.org](https://reports.weforum.org/docs/WEF_Green_Logistics_Innovation_for_Emerging_Markets_Driving_Competitiveness_and_Shared_Value_2025.pdf). Retrieved January 11, 2026 from https://reports.weforum.org/docs/WEF_Green_Logistics_Innovation_for_Emerging_Markets_Driving_Competitiveness_and_Shared_Value_2025.pdf
8. Updated Ukraine Recovery and Reconstruction Needs Assessment Released (RDNA3). World Bank [Press release]. [worldbank.org](https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2024/02/15/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment-released). Retrieved January 21, 2026 from <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2024/02/15/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment-released>
9. Updated Ukraine Recovery and Reconstruction Needs Assessment Released (RDNA4). World Bank [Press release]. [worldbank.org](https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2025/02/25/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment-released). Retrieved January 21, 2026 from <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2025/02/25/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment-released>
10. Priorities for Ukraine's Recovery in 2025: Key indicators and main findings of the RDNA4 report. Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine [Official website]. [mindev.gov.ua](https://mindev.gov.ua/news/priorityty-vidnovlennia-ukrainy-na-2025-osnovni-pokaznyky-ta-tezy-zvitu-rdna4). Retrieved January 21, 2026 from <https://mindev.gov.ua/news/priorityty-vidnovlennia-ukrainy-na-2025-osnovni-pokaznyky-ta-tezy-zvitu-rdna4> [in Ukrainian].

11. Statistics Explained: Transport. Eurostat [Official website of Eurostat]. ec.europa.eu. Retrieved January 22, 2026 from <https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=Category:Transport>
12. Most goods transported by sea within the EU in 2023. Eurostat [Official website of Eurostat]. ec.europa.eu. Retrieved January 22, 2026 from <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20250416-1>
13. Maritime transport dominates international trade. Eurostat [Official website of Eurostat]. ec.europa.eu. Retrieved January 22, 2026 from <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/edn-20250925-1>
14. Solidarity Lanes: Latest figures – August 2024. European Commission [Official website of the European Commission]. transport.ec.europa.eu. Retrieved January 22, 2026 from https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/solidarity-lanes-latest-figures-august-2024-2024-09-20_en
15. EU trade with Ukraine – latest developments. Eurostat [Official website of Eurostat]. ec.europa.eu. Retrieved January 23, 2026 from https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=EU_trade_with_Ukraine_-_latest_developments
16. Reports on the implementation of the EU–Ukraine Association Agreement. Government Portal of Ukraine [Official website]. kmu.gov.ua. Retrieved January 23, 2026 from <https://www.kmu.gov.ua/diyalnist/yevropejska-integraciya/vikonannya-ugodi-pro-asociaciyu/zviti-pro-vikonannya-ugodi-pro-asociaciyu> [in Ukrainian]
17. Bulletin of Ukraine – EU trade relations, 2024. Ministry of Economy of Ukraine [Official website]. me.gov.ua. Retrieved January 23, 2026 from <https://me.gov.ua/Documents/Detail/a6ad9cff-feae-429c-93d6-68dc618435f9?lang=en-GB>
18. Ukraine Report 2025. Enlargement Package. European Commission [Official website of the European Commission]. enlargement.ec.europa.eu. Retrieved January 23, 2026 from https://enlargement.ec.europa.eu/ukraine-report-2025_sl
19. EU–Ukraine Solidarity Lanes. European Commission [Official website of the European Commission]. commission.europa.eu. Retrieved January 24, 2026 from https://commission.europa.eu/topics/eu-solidarity-ukraine/eu-assistance-ukraine/eu-ukraine-solidarity-lanes_en
20. EU funding for better transport connections. European Commission [Official website of the European Commission]. transport.ec.europa.eu. Retrieved January 24, 2026 from https://transport.ec.europa.eu/ukraine/eu-ukraine-solidarity-lanes/eu-funding-better-transport-connections_en

Дата першого надходження статті до видання: 27.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 536.71

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2026.1-28.03>

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ СКЛАДАННЯ ЄДИНОГО РІВНЯННЯ СТАНУ СУМІШІ ХОЛОДОАГЕНТІВ 3,3,3-ТРИФТОРПРОПЕН (R1243ZF) + ІЗОБУТАН (R600A) ЗА НАЯВНИМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ДАНИМИ

В.П. Мальчевський¹, Н.І. Александровська², О.В. Єриганов³

¹професор кафедри суднових енергетичних систем та комплексів
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0003-3117-1251

²доцент кафедри суднових енергетичних систем та комплексів
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0001-6591-2068

³доцент кафедри суднових енергетичних систем та комплексів
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0009-0009-9051-3400

Анотація

Вступ. Стаття присвячена вирішенню проблеми оптимального вибору холодоагенту, який має відповідати діючим експлуатаційним та екологічним вимогам. Основними критеріями в цьому виборі є: з одного боку – відсутність руйнівного впливу на озоновий шар Замлі, з іншого – низький потенціал глобального потепління, який обумовлений в першу чергу високою ефективністю холодильного обладнання. **Метою** роботи є дослідження можливості складання єдиного рівняння стану суміші холодоагентів R1243zf та R600a за наявними експериментальними даними про термодинамічні властивості. **Результати.** Виконано аналіз наявних даних про термодинамічні властивості суміші R1243zf/R600a. На базі експериментальних даних про температуру, тиск та питомий об'єм суміші у області пари складено вихідне рівняння стану у формі, яка представляє собою розкладання безрозмірної вільної енергії Гельмгольца суміші на ідеально-газову та реально-газову складову. При цьому реально-газова складова комбінується з енергій Гельмгольца компонентів та функції взаємодії, складеної на базі експериментальних даних про термодинамічні властивості суміші. Оскільки дані про густину суміші у стані насичення відсутні, відповідні значення отримані розрахунковими методами. А саме, значення густини насиченої пари отримані шляхом розрахунку за складеним вихідним рівнянням для області пари, а відповідні значення густини насиченої рідини отримані шляхом комбінації безрозмірних значень приведенного питомого об'єму компонентів суміші. Експериментальні значення густини пари і розраховані значення густини, отримані для експериментальних значень тиску насиченої пари мають прийнятну точність опису вихідним



рівнянням. Дані про густину насиченої рідини, які також отримані для відповідних експериментальних значень тиску також досить точно описують самі себе, але додавання їх до рівняння стану пари призводить до різкого збільшення відхилень вихідного масиву даних. Це може бути пояснено обмеженістю даних про густину пари лише низькими та помірними значеннями тиску. Отже, поява нових експериментальних даних для досліджуваної суміші надасть можливість для складання рівняння стану для розрахунку властивостей у стані насичення як у області пари, так і у області рідини. **Висновки.** Суміш холодоагентів R1243zf/R600a є перспективною робочою речовиною для використання у холодильній техніці та системах опалення, вентиляції та кондиціонування повітря. Дослідження теплофізичних властивостей цієї суміші знаходяться на початковому етапі, що обумовило обмеженість експериментальних даних по ній. Тим не менш, спроба складання єдиного рівняння стану цієї речовини у рамках даної роботи має певні успіхи. Отримане рівняння стану досліджуваної суміші, яке описує властивості перегрітої та насиченої пари. Через вузький діапазон вихідних експериментальних даних про температуру, тиск та густину не вдалося описати єдиним рівнянням повний набір опорних даних про густину насиченої пари та рідини. Однак, поява нових, більш розширених за діапазонами дослідних даних скоріше за все дозволить отримати єдине рівняння стану для досліджуваної суміші, яке також урахуватиме умову фазової рівноваги тиску та густини у стані насичення для однакових значень складу пари та рідини, яке необхідне для можливості коректного розрахунку колоричних властивостей.

Ключові слова: міжнародні вимоги, суміш холодоагентів R1243zf/R600a, експериментальні дані, термодинамічні властивості, єдине рівняння стану, енергія Гельмгольца, фазова рівновага.

**INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF COMPILING
A UNIFIED EQUATION OF STATE FOR A MIXTURE
OF 3,3,3-TRIFLUORO-PROPENE (R1243ZF) + ISOBUTANE (R600A)
BASED ON AVAILABLE EXPERIMENTAL DATA**

V.P. Malchevsky¹, N.I. Aleksandrovska², O.V. Yeryganov³

¹professor of the Department of Ships Energetic Systems and Plants
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-3117-1251

²assistant professor of the Department of Ships Energetic Systems and Plants
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0001-6591-2068

³assistant professor of the Department of Ships Energetic Systems and Plants
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine
ORCID ID: 0009-0009-9051-3400

Summary

Introduction. The article is devoted to solving the problem of the optimal choice of refrigerant, which must satisfy current operational and environmental requirements. The main criteria for this choice are: on the one hand, the absence of a destructive impact on the Earth's ozone layer, and on the other hand, low global warming potential,

which is primarily due to the high efficiency of refrigeration equipment. **The purpose of the work** is to investigate the possibility of compiling a unified equation of state for the mixture of refrigerants R1243zf and R600a based on available experimental data on thermodynamic properties. **The results.** An analysis of available data on the thermodynamic properties of the R1243zf/R600a mixture was performed. On the basis of experimental data on the temperature, pressure and specific volume of the mixture in the vapour region, an initial equation of state was compiled in the form of a decomposition of the dimensionless Helmholtz free energy of the mixture into ideal gas and real gas components. In this case, the real gas component is combined with the Helmholtz energies of the components and the interaction function compiled on the basis of experimental data on the thermodynamic properties of the mixture. Since there is no data on the density of the mixture in the saturated state, the corresponding values were obtained by calculation methods. Namely, the values of saturated vapour density are obtained by calculation using the derived equation for the vapour region, and the corresponding values of saturated liquid density are obtained by combining the dimensionless values of the reduced specific volume of the mixture components. The experimental values of vapour density and the calculated values of density obtained for the experimental values of saturated vapour pressure have an acceptable accuracy of description by the initial equation. The data on the density of saturated liquid, which were also obtained for the corresponding experimental pressure values, also describe themselves quite accurately, but adding them to the vapour equation of state leads to a sharp increase in the deviations of the initial data array. This can be explained by the limitation of the data on vapour density to low and moderate pressure values only. Therefore, the appearance of new experimental data for the investigated mixture will provide an opportunity to compile an equation of state for calculating properties in the saturated state in both the vapour and liquid regions. **Conclusions.** The R1243zf/R600a refrigerant mixture is a promising working substance for use in refrigeration technology and heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems. Research of the thermophysical properties of this mixture is at an early stage, which has led to limited experimental data on it. Nevertheless, an attempt to compile a single equation of state for this substance within the framework of this work has been somewhat successful. The resulting equation for the investigated mixture describes the properties of preheated and saturated vapour. Due to the narrow range of initial experimental data on temperature, pressure and density, it was not possible to describe the complete set of reference data on the density of saturated vapour and liquid with a unified equation. However, the appearance of new experimental data with more expanded ranges will most likely allow us to obtain a unified equation of state for the investigated mixture, which will also take into account the condition of phase equilibrium of pressure and density in the saturated state for the same values of steam and liquid composition, which is necessary for the correct calculation of calorific properties.

Key words: international regulations, R1243zf/R600a refrigerant mixture, experimental data, thermodynamic properties, unified equation of state, Helmholtz energy, phase equilibrium.

Вступ. Підписаний у 1987 році Монреальський протокол «про речовини, що руйнують озоновий шар» [1] та Кіотський протокол [2], який зафіксував список парникових газів значно обмежили перелік можливих холодоагентів. Остання, Кігалійська поправка до Монреальського протоколу [3] та новий Регламент Європейського союзу щодо фторвмісних газів [4] накладають у майбутньому обмеження на речовини з потенціалом глобального потепління (ПГП) більшим, ніж 150.

Таким чином, пошук ефективних робочих речовин холодильних установок та систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря має базуватися на компромісі між відсутністю руйнівного впливу на озоновий шар Землі – з одного боку та забезпеченням високої ефективності у роботі обладнання – з іншого. Робота з низькою ефективністю призводить до збільшення вартості отримання холоду, а також призводить до значного збільшення ПГП, що робить таку речовину небезпечним парниковим газом.

У процесі пошуку оптимальних холодоагентів з моменту підписання Монреальського протоколу утворилося чотири генерації холодоагентів [5]. До останньої, четвертої генерації разом із природними речовинами відносяться гідрофторолефіни (HFO) та гідрохлорфторолефіни (HCFO), які не руйнують озоновий шар Планети та мають надзвичайно низький ПГП. Однак, у [5] зазначено, що є певні сумніви щодо сумісності HFO (HCFO) з навколишнім середовищем, оскільки їх розкладання у атмосфері може утворювати такі з'єднання, як: трифтороцтова кислота, фторид водню та фторид карбоніду.

Однак, не зважаючи на те, що використання гідрофторолефінів (гідрохлорфторолефінів) пов'язане із певними труднощами, вони мають перспективу на використання через відсутність руйнівного впливу на озоновий шар та практично нульовий ПГП. Зменшення негативних особливостей цих речовин може бути досягнуте шляхом змішування з іншими холодоагентами, зокрема, із природними речовинами.

З тією ж метою було створено суміш R1243zf/R600a (та ряд інших, подібних до неї). Так, 3,3,3-трифторпропен (R1243zf) – горючий холодоагент, має клас A2 за стандартом ASHRAE [6] та подібний за термодинамічними властивостями до R134a. Ізобутан R600a відомий своєю високою ефективністю, тому суміш R1243zf/R600a повинна бути не менш ефективна, ніж R134a, але мати значно менший ПГП. Наявність експериментально отриманих термодинамічних властивостей дає можливість складання рівняння стану.

Постановка проблеми. До 90-х років минулого століття як холодоагенти використовувалися галоїдопохідні метанового та етанового ряду (хлорфторвуглеці – ХФВ та гідрофторхлорвуглеці – ГХФВ). Вони безпечні для використання та енергоефективні. Однак, відповідно до Монреальського [1] та Кіотського [2] протоколів, на них почали діяти суворі обмеження через руйнівну дію на озоновий шар Землі. Згодом, значні обмеження [3] торкнулися і більшості речовин (здебільшого, гідрофторвуглеців – ГФУ), запропонованих як альтернатива забороненим озоноруйнівним холодоагентам через високі значення потенціалу глобального потепління (ПГП).

Аналіз найбільш популярних робочих речовин [7] показав, що жодна з них не забезпечує ефективність холодильного обладнання, яка мала місце при

використанні заборонених хлорвмісних холодоагентів. Тому актуальною проблемою, порушеною у статті, є вибір оптимальної робочої речовини для холодильного та теплопостачального обладнання. Як зазначено у [8] компроміс при виборі робочих речовин для холодильників та теплових насосів повинен знаходитися між безпекою та термодинамічними властивостями.

У процесі наукового пошуку максимально безпечних та ефективних речовин, який продовжує відбуватися і тепер було розроблено чотири генерації холодоагентів [5]. До останньої відносяться природні речовини, гідрофторолефіни (ГФО), гідрохлорфторолефіни (ГХФО) та гідрофторетери (ГФЕ). Особливістю ГФО та ГХФО є наявність в їх молекулярній структурі принаймні одного подвійного зв'язку «вуглець – вуглець», що обумовлює низьке значення ПГП. У [5] зазначено, що атоми фтору (хлору) у молекулах ГФО (ГХФО) можуть бути причиною горючості та викликати складнощі при тривалому знаходженні у атмосфері. Останні можливі через те, що їх розкладання у атмосфері може утворювати такі з'єднання, як: трифтороцтова кислота, фторид водню та фторид карбоніду.

Тим не менш дослідження ГФО (ГХФО) тривають і є підстави вважати, що їх змішування з іншими речовинами дозволить зменшити небажані особливості суміші у порівнянні з чистими речовинами. Так вчені [8,9,10] запропонували дослідити за хімічними та теплофізичними характеристиками, впливом на довкілля та безпекою при використанні суміш R1243zf/R600a, як потенційний замітник відповідних чистих компонентів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Найбільш систематичний аналіз холодоагентів (серед яких є ГФО та ГХФО) виконаний авторами [7], які вибрали шістдесят дві найбільш привабливі речовини. У цій роботі зазначено, що серед інших ГФО 3,3,3-трифторпропен (R1243zf) крім низького ПГП (приблизно 0,29) також має термодинамічні властивості, схожі з R134a (з ПГП відповідно – 1430). До того ж у роботі [11] відмічено, що він значно дешевший за R1234yf, який визнано найбільш дослідженим заміником R134a.

У свою чергу, ізобутан R600a (його ізомер н-бутан R600 має аналогічну з R600a хімічну формулу, але відрізняється будовою молекул і використовується здебільшого у побутових газових балонах та як паливо для автомобілів) є відомим природним холодоагентом, який попри свої горючі властивості має високу ефективність і тому широко використовується у побутових холодильниках та кондиціонерах. Таким чином, суміш R1243zf/R600a має бути не менш ефективною, ніж R134a, але мати значно менший ПГП.

Обидва компоненти суміші є добре дослідженими з термодинамічної точки зору. Для R1243zf у роботі використовується фундаментальне рівняння стану [12], яке є третім, найбільш удосконаленим рівнянням цих авторів (перше було представлено у 2016 році). Воно ураховує наявні дослідні дані з термічних і калоричних властивостей у інтервалі температур від потрібної точки до 430 К для значень тиску до 35 МПа. Для R600a обрано фундаментальне рівняння [13], яке також дозволяє розраховувати з високою точністю повний набір термодинамічних властивостей речовини при температурах від кривої плавлення до 340 К для значень тиску до 69 МПа.

Для суміші R1243zf/R600a у однофазній області наявні лише дані про температуру, тиск та густину перегрітої пари [9], отримані для чотирьох ізохор (0,0944; 0,1614; 0,2306 та 0,6145 м³/кг) при температурах від 303 до 383 К для значень мольної долі компоненту R600a від 0,225 до 0,898.

У стані насичення експериментальні дані обмежені лише значеннями температури та тиску [8,10], отримані за допомогою апарату для рециркуляції пари у поєднанні з газохроматографічним аналізом для значень мольних долей насичених пари та рідини компоненту R1243zf у інтервалі від 0 до 1. У роботі [8] значення тиску отримані на п'яти ізотермах у інтервалі від 283,15 до 323,15 К. Відповідно, дослідні значення насиченого тиску [10] охоплюють інтервал температур від 253,15 до 293,15 також на п'яти ізотермах. Експериментальні значення густини у насиченні на даний момент відсутні і тому були отримані у роботі розрахунковим шляхом.

Формулювання цілей статті. Метою статті є спроба складання єдиного рівняння стану суміші холодоагентів R1243zf/R600a у формі безрозмірної вільної енергії Гельмгольца на базі наявних експериментальних даних з використанням рівнянь стану компонентів суміші.

Виклад основного матеріалу. На базі експериментальних даних [9] складене вихідне рівняння стану, яке дозволяє розраховувати властивості перегрітої пари в інтервалі температур від 303 до 384 К при значеннях тиску до 0,37 МПа. Для складання рівняння стану суміші використана методика [14], у відповідності до якої рівняння має вигляд:

$$A = A^{id} + A^E, \quad (1)$$

де A та A^{id} – вільні енергії Гельмгольца реальної та ідеальної суміші, A^E – добавка до енергії Гельмгольца від змішування. Величини A^{id} та A^E для бінарної суміші можуть бути розраховані за виразами:

$$A^{id} = \sum_{k=1}^2 x_k \left[A_k^0(\omega, \tau) + A_k^r(\omega, \tau) + RT \ln x_k \right], \quad (2)$$

$$\frac{A^E}{RT} = \alpha^E(\omega, \zeta, x) = x_1 x_2 \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^r a_{ij} \omega^i \tau^{-j} + \exp(-\omega^2) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^s b_{ij} \omega^i \tau^{-j} \right] \quad (3)$$

де у виразі (2) A_k^0 і A_k^r – ідеально-газова і реально-газова частини вільної енергії Гельмгольца компоненту k , x_k – мольні долі компонентів суміші. У виразі (3) a_{ij} і b_{ij} – коефіцієнти функції взаємодії, які визначаються на базі експериментальних даних про термодинамічні властивості суміші, $\omega = V_c/V$ і $\tau = T/T_c$ – приведені густина та температура суміші. Величини V_c і T_c – це псевдокритичні значення питомого об'єму і температури суміші, розраховані на базі так званої лінійної моделі за допомогою виразів:

$$V_c = x_1 V_{c1} + x_2 V_{c2}, \quad (4)$$

$$T_c = x_1 T_{c1} + x_2 T_{c2}, \quad (5)$$

де V_{c1} , V_{c2} і T_{c1} , T_{c2} – критичні значення питомого об'єму і температури компонентів.

Експериментальні дані про густину насиченої пари для досліджуваної суміші відсутні, тому відповідні значення були розраховані за допомогою складеного

вихідного рівняння з використанням дослідних значень тиску насиченої пари. У наявності є 44 значення тиску [8] при температурах від 283,15 до 323,15 К та, відповідно, 40 значень p [10] для температур 253,15 – 293,15 К. Але через обмежену область дії вихідного рівняння отримати вдалося лише 17 значень густини насиченої пари для значень тиску [8] при температурах 283,15 та 293,15 К та, відповідно, 32 значення густини за даними по тиску [10] для інтервалу температур від 253,15 до 283,15 К.

Експериментальні дані про густину насиченої рідини суміші також відсутні, тому були зіставлені відповідні дані для компонентів у приведених координатах $\varphi' = v'/v_{кр}$ і $\tau = T/T_{кр}$ та встановлено, що значення φ' при однакових τ для R1243zf та R600a в інтервалі приведених температур, охопленому експериментом по суміші, відрізняються не більше, ніж на 3,2 % (при найбільш низьких температурах). Тому 40 значень φ' суміші були розраховані як адитивні величини за даними для компонентів з урахуванням складу суміші.

У якості ваг експериментальних значень коефіцієнту стиснення суміші $Z = p/\rho RT$, який залежить не тільки від параметрів стану p, ρ, T , а також від мольної концентрації компонентів x і $1 - x$, у роботі прийнята величина $1/\sigma_z^2$, где σ_z^2 – дисперсія величини Z . Через те, що в експериментах температура і тиск вимірюються досить точно (очікувана погрішність складає 0,01 – 0,03 К для термометрів опору типу Hart Scientific 5680-7-1036 та 1 кПа для перетворювачів тиску типу Ruska 7000), величини відносних погрішностей δp і δT при розрахунку ваг можна прийняти рівними нулю. У цьому випадку дисперсія коефіцієнту стиснення може бути розрахована за формулою:

$$\sigma_z^2 = \left(\frac{Z_{експ.}}{\rho} + \frac{\partial Z_{розн.}}{\partial \rho} \right)^2 \left(\frac{\rho \cdot \delta \rho}{2} \right)^2 + \left(\frac{\partial Z_{розн.}}{\partial x} \right)^2 \left(\frac{x \cdot \delta x}{2} \right)^2, \quad (6)$$

де $\delta \rho$ і δx – максимальні значення відносних погрішностей за густиною та складом.

Значення похідних $\partial Z_{розн.}/\partial \rho$ і $\partial Z_{розн.}/\partial x$ у виразі (6) розраховувалися за наближеним рівнянням стану, отриманому лінійною комбінацією реально-газових частин вільної енергії Гельмгольца компонентів суміші.

Значення середнього квадратичного відхилення експериментальних даних про густину [9] і розрахованих за вихідним рівнянням стану суміші (складеним на базі даних [9]) склало 0,07 % для 50 експериментальних точок. Автори [9] також виконали апроксимацію свої даних за допомогою рівняння Пенга та Робінсона та досягли значення середнього квадратичного відхилення по питомому об'єму для 66 точок 0,099 %.

Дані про густину насиченої пари, які отримані розрахунковим шляхом для експериментальних значень тиску [8,10] також непогано описуються рівнянням, складеним лише на їх базі (середнє квадратичне відхилення по густині для 49 точок склало 0,17 %). Але спроби скласти рівняння стану на базі повного масиву даних [8, 9, 10] приводили до різкого погіршення точності опису через взаємний вплив.

Дослідним шляхом було отримане рівняння стану на базі 30 опорних значень густини насиченої пари (з 49 наявних) та 50 дослідних значень густини перегрітої пари [9]. Відповідні значення середніх квадратичних відхилень по густині для

30 точок насиченої, 50 точок перегрітої пари та для повного масиву з 80 точок склали: 0,09 та 0,355 та 0,23 %.

Опорні значення густини насиченої рідини також мають високу точність опису рівнянням, складеним на базі цих значень (середнє квадратичне відхилення склало 0,011 % для 40 точок), але підібрати прийнятний варіант рівняння, яке б одночасно урахувало дані про густину насичених пари та рідини, на жаль, не вдалося через різке зменшення точності опису всіх груп даних. З тієї ж причини не є можливим урахувати умову фазової рівноваги тиску та густини у стані насичення для однакових значень складу пари та рідини, яке необхідне для можливості розрахунку колоричних властивостей.

Значення коефіцієнтів a_{ij} і b_{ij} функції взаємодії (3) рівняння стану суміші R1243zf/R600a, яке урахує 80 точок [8,9,10] були визначені на базі покрокового регресійного аналізу з використанням алгоритму, запропонованому у роботі [14]. Значення коефіцієнтів рівняння представлені у таблиці 1.

Таблиця 1

Коефіцієнти a_{ij} і b_{ij} функції взаємодії (3) суміші R1243zf/R600a

i	j	a_{ij}	i	j	a_{ij}
1	0	$-8,26917430 \cdot 10^{-2}$	6	6	$-3,58873231 \cdot 10^{-11}$
1	1	$-7,77028012 \cdot 10^{-2}$	7	6	$8,37865500 \cdot 10^{-12}$
1	4	$-7,64854482 \cdot 10^{-6}$	8	1	$-2,25027338 \cdot 10^{-12}$
2	0	$1,23353267 \cdot 10^{-5}$	8	6	$-8,00163600 \cdot 10^{-13}$
2	2	$6,63316258 \cdot 10^{-4}$	9	5	$5,83282335 \cdot 10^{-14}$
2	6	$-5,67979523 \cdot 10^{-4}$	10	0	$1,86711081 \cdot 10^{-15}$
3	6	$3,32224755 \cdot 10^{-4}$			b_{ij}
4	0	$-4,62477007 \cdot 10^{-6}$	1	4	$7,64785460 \cdot 10^{-6}$
4	3	$2,19123450 \cdot 10^{-8}$	2	5	$1,54104043 \cdot 10^{-5}$
4	5	$-2,53601162 \cdot 10^{-7}$	3	1	$-5,64982517 \cdot 10^{-6}$
5	6	$6,37206558 \cdot 10^{-9}$	8	4	$-2,92090451 \cdot 10^{-13}$

Треба відмітити, що отримані результати для суміші R1243zf/R600a мають здебільшого проміжний характер. Але ця робота буде продовжена з появою нових експериментальних даних для досліджуваної суміші у областях пари та рідини.

Висновки. Виконано аналіз та поповнення даних про термодинамічні властивості перспективної суміші ознобезпечного гідрофторолефіну (ГФО) 3,3,3-трифторпропену (R1243zf) із практично нульовим потенціалом глобального потепління (ППП) та відомого ефективного природного холодоагенту ізобутану (R600a). Суміш на даний момент є досліджуваною, тому кількість наявних експериментальних даних по ній є невеликою.

У роботі була виконана спроба складання єдиного рівняння стану для пари та рідини на базі масиву експериментальних і додатково отриманих опорних даних, однак вдалося отримати тільки рівняння стану для перегрітої та насиченої пари. Частина даних, серед яких опорні значення густини насиченої рідини та значення густини пари при високих тисках, підключити до процесу складання рівняння стану не вдалося через значне погіршення точності опису вихідного масиву даних.

Таким чином, отримане рівняння стану має проміжний характер, оскільки через відсутність урахування умови фазової рівноваги тиску та густини у стані насичення для однакових значень складу пари та рідини не можливо коректно розрахувати калоричні властивості суміші.

Однак, планується продовжити дану роботу із складання єдиного рівняння стану суміші R1243zf/R600a при появі нових експериментальних даних, які поширять область дії рівняння. Це є цілком очікуваним, оскільки суміш має великі перспективи для подальшого використання.

ЛІТЕРАТУРА

1. UNEP. Montreal Protocol on Substances That Deplete The Ozone Layer. Final Act: date – 11 September 1987. 6 p.
2. Breidenich C, Magraw D, Rowley A, Rubin JW, 1998. The Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. *American Journal of International Law*, V. 92 (2). P. 315–331. <http://dx.doi.org/doi:10.2307/2998044>.
3. United Nations Environmental Programme, 2016. United nations environment programme. The Kigali Amendment to the Montreal Protocol: HFC Phase-down. URL: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/26589>
4. European Commission, 2014. European Commission. Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases repealing Regulation (EC) No 842/2006 Text with EEA relevance. URL <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2014/517/oj>
5. Fedele L., Castelli S.T, Ielpo P., Zilio C., Bobbo S., 2023. The environmental impact of HFOs from TEWI to PFAS. A review. <http://dx.doi.org/10.18462/iir.icr.2023.0442>
6. ASHRAE, 2019. Standard 34-2019 designation and safety classification of refrigerants. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.: Atlanta, GA, USA.
7. Mark O. McLinden, Andrei F. Kazakov, J. Steven Brown, Piotr A. Domanski, 2014. A thermodynamic analysis of refrigerants: Possibilities and tradeoffs for Low-GWP refrigerants, *International Journal of Refrigeration*, V. 38. P. 80–92. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.09.032>.
8. Davide Menegazzo, Giulia Lombardo, Laura Fedele, Sergio Bobbo, Min Soo Kim, Yeonwoo Jeong, Sangwook Lee, 2024. Isothermal (vapor + liquid) equilibrium measurements and correlation of the binary mixture 3,3,3-trifluoropropene (R1243zf) + isobutane (R600a) at temperatures from 283.15 to 323.15 K, *International Journal of Refrigeration*, V. 161. P. 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.02.032>.
9. Sebastiano Tomassetti, Mariano Pierantozzi, Giovanni Di Nicola, Fabio Polonara, and J. Steven Brown, 2019. Vapor-Phase PvTx Measurements of Binary Blends of cis-1,2,3,3,3-Pentafluoroprop-1-ene + Isobutane and 3,3,3-Trifluoropropene + Isobutane, *Journal of Chemical & Engineering Data*, V. 64 (2). P. 688–695. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.8b00921>

10. Zhanfeng Deng, Guizhi Xu, Sainan Sun, Yanxing Zhao, Xueqiang Dong, Maoqiong Gong, 2020. Isothermal (vapour-liquid) equilibrium for the binary {isobutane (R600a) + 3,3,3-trifluoropropene (R1243zf)}cc system at temperatures from 253.150 to 293.150 K, *Journal of Chemical Thermodynamics*, V. 150. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2020.106177>
11. Xiaoyu Yao, Li Ding, Xueqiang Dong, Yanxing Zhao, Xian Wang, Jun Shen, Maoqiong Gong, 2020. Experimental measurement of vapor-liquid equilibrium for 3,3,3-trifluoropropene(R1243zf) + 1,1,1,2-tetrafluoroethane(R134a) at temperatures from 243.150 to 293.150 K, *International Journal of Refrigeration*, V. 120. P. 97–103. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.09.008>
12. Akasaka, R., Lemmon, E.W., 2025. A Helmholtz Energy Equation of State for 3,3,3-Trifluoroprop-1-ene (R-1243zf). *Int J Thermophys*, V. 46 (23). <https://doi.org/10.1007/s10765-024-03481-6>
13. D. Bucker; W. Wagner, 2006. Reference Equations of State for the Thermodynamic Properties of Fluid Phase n-Butane and Isobutane. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, V. 35. P. 929–1019. <https://doi.org/10.1063/1.1901687>
14. K. M. de Reuck and B. Armstrong, 1979. A method of correlation using a search procedure, based on a step-wise least-squares technique, and its application to an equation of state for propylene. *Cryogenics*, V. 19 (9). P. 505–512. [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(79\)90002-X](https://doi.org/10.1016/0011-2275(79)90002-X).

Дата першого надходження статті до видання: 26.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

**ЖИТТЄВИЙ ЦИКЛ СУДНА ЯК ФАКТОР ТЕХНОГЕННОГО ВПЛИВУ:
ЕКОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ЕТАПІВ ТА ЗАХОДИ МІНІМІЗАЦІЇ**

Л.В. Пізінцалі¹, О.І. Россомаха², С.М. Дімова³, О.А. Россомаха⁴

¹к.т.н., доцент, доцент кафедри суднобудування і судноремонту
ім. проф. Ю.Л. Воробйова,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-8046-0917

²к.т.н., доцент, доцент кафедри навігації і керування судном,
доцент кафедри суднобудування і судноремонту ім. проф. Ю.Л. Воробйова,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-4425-2192.

³к.т.н., доцент, доцент кафедри суднобудування і судноремонту
ім. проф. Ю.Л. Воробйова,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0009-0009-1220-5592.

⁴доцент ОНМУ,
начальник навчального відділу,
доцент кафедри суднових енергетичних систем і комплексів,
Навчально-науковий інститут морського флоту
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-0230-9453.

Анотація

Вступ. Морське судноплавство є однією з ключових галузей світової економіки, забезпечуючи значну частину вантажних і пасажирських перевезень. Водночас функціонування морського транспорту супроводжується значним техногенним впливом на навколишнє середовище, що проявляється у різноманітних видах забруднення: атмосферних викидах, витоках нафтопродуктів, скиданні стічних вод, утворенні твердих та небезпечних відходів, шумовому та біологічному забрудненні, включно з перенесенням інвазійних видів. Зростання обсягів морських перевезень у поєднанні з глобалізацією економіки та інтенсивною експлуатацією суден спричиняє накопичувальний ефект забруднень, особливо у прибережних та портових зонах. У сучасних наукових дослідженнях акцент робиться на необхідності комплексного підходу до оцінки екологічного впливу, що враховує усі етапи життєвого циклу судна – від концепції та проектування до експлуатації, списання та утилізації, зокрема у рамках концепції «зеленого судноплавства» та міжнародних екологічних норм.

Метою даної роботи є удосконалення підходу до аналізу життєвого циклу судна як системного джерела техногенного впливу на навколишнє середовище шляхом систематизації екологічних факторів на різних етапах його існування та розробки методики оцінки експлуатаційних викидів суднових енергетичних установок із врахуванням різних режимів руху та умов маршруту. Досягнення цієї мети передбачає визначення етапів життєвого циклу з найбільшим внеском у сумарне забруднення, кількісне оцінювання джерел техногенного впливу.



Результати. У роботі здійснено комплексний аналіз основних етапів життєвого циклу судна: концепції та планування, проектування, будівництва, експлуатації, оцінки та списання, а також утилізації. Для кожного етапу визначено специфічні джерела техногенного навантаження та їх вплив на водне та атмосферне середовище, включно з утворенням відходів та шумовим забрудненням. Найбільший вплив встановлено на етапі експлуатації, який може тривати кілька десятиліть і характеризується значними обсягами викидів нафтопродуктів, стічних та баластних вод, атмосферних забруднень, твердих відходів та хімічних сполук, що створюють довгострокові екологічні ризики. Запропоновано структурну модель життєвого циклу судна у вигляді блок-схеми, яка відображає послідовність етапів та їх взаємозв'язок, дозволяючи врахувати накопичувальний характер екологічного впливу. Для оцінки експлуатаційних викидів запропоновано підхід із поділом маршруту на сегменти з різними режимами роботи енергетичної установки та використанням емісійних коефіцієнтів для різних видів палива. Це дозволяє визначити внесок кожного режиму роботи та сегмента маршруту у сумарні викиди судна, що створює основу для оптимізації маршрутів, вибору видів палива та розробки заходів з підвищення енергоефективності та зменшення негативного впливу на довкілля.

Висновки. Проведене дослідження засвідчує, що життєвий цикл судна є комплексним джерелом техногенного впливу, причому найбільш критичним за екологічним навантаженням є етап експлуатації, що формує основну частку викидів і відходів. Запропонована структурна модель життєвого циклу та методика кількісної оцінки експлуатаційних викидів дозволяють інтегрувати дані про всі етапи функціонування судна, визначати пріоритетні напрямки зменшення екологічного впливу та порівнювати альтернативні технічні та експлуатаційні рішення. Отримані результати можуть використовуватися для розробки екологічно ефективних стратегій управління морським транспортом, оптимізації експлуатаційних режимів, планування маршрутів і підвищення ефективності «зеленого судноплавства», що має важливе значення для захисту морських екосистем, поліпшення якості повітря та збереження біорізноманіття прибережних зон.

Ключові слова: судно, життєвий цикл, етапи життєвого циклу, навколишнє середовище, аналіз, модель життєвого циклу, модель викидів, експлуатація, екологія.

**THE LIFE CYCLE OF A SHIP AS A FACTOR OF TECHNOLOGICAL IMPACT:
ECOLOGICAL ANALYSIS OF STAGES AND MINIMIZATION MEASURES**

L.V. Pizintali¹, O.I. Rossomakha², S.M. Dimova³, O.A. Rossomakha⁴

¹Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Shipbuilding and Ship Repair
named after Prof. Yu.L. Vorobyov,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-8046-0917

²Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Navigation and Control of the Ship,
Associate Professor at the Department of Shipbuilding and Ship Repair
named after Prof. Yu.L. Vorobyov,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-4425-2192.

³Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Shipbuilding and Ship Repair
named after Prof. Yu.L. Vorobyov,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0009-0009-1220-5592

⁴Associate Professor ONMU,
Head of the Educational and Methodical Department,
Associate Professor at the Department of Ship Power Systems and Complexes,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-0230-9453

Summary

Introduction. *Maritime shipping is one of the key sectors of the global economy, accounting for a significant portion of freight and passenger transport. At the same time, the operation of maritime transport has a significant anthropogenic impact on the environment, manifesting itself in various forms of pollution: atmospheric emissions, oil spills, wastewater discharge, the generation of solid and hazardous waste, noise and biological pollution, including the spread of invasive species. The growth in maritime transport volumes, combined with economic globalization and intensive ship operation, leads to a cumulative effect of pollution, particularly in coastal and port areas. Current scientific research emphasizes the need for a comprehensive approach to assessing environmental impact that takes into account all stages of a ship's life cycle—from concept and design to operation, decommissioning, and disposal—particularly within the framework of the “green shipping” concept and international environmental standards.*

Purpose. *The aim of this study is to improve the approach to analyzing the life cycle of a vessel as a systemic source of anthropogenic impact on the environment by systematizing environmental factors at various stages of its existence and developing a methodology for assessing operational emissions from ship power plants, taking into account different operating modes and route conditions. Achieving this goal involves identifying the life cycle stages that contribute most to total pollution, quantitatively assessing sources of anthropogenic impact, and developing a structural model that allows for the integration of data on all stages of a ship's operation.*

Results. *This study provides a comprehensive analysis of the main stages of a ship's life cycle: concept and planning, design, construction, operation, assessment and*

decommissioning, as well as disposal. For each stage, specific sources of anthropogenic impact and their effects on the aquatic and atmospheric environments were identified, including waste generation and noise pollution. The greatest impact was found during the operation stage, which can last several decades and is characterized by significant volumes of emissions of petroleum products, wastewater and ballast water; atmospheric pollutants, solid waste, and chemical compounds that pose long-term environmental risks. A structural model of a ship's life cycle is proposed in the form of a flowchart, which reflects the temporal sequence of stages and their interrelationships, allowing for the cumulative nature of environmental impact to be taken into account. To assess operational emissions, an approach has been developed that divides the route into segments with different power plant operating modes and uses emission factors for different fuel types. This methodology allows determining the contribution of each operating mode and route segment to the ship's total emissions, which provides a basis for route optimization, fuel selection, and the development of measures to improve energy efficiency and reduce negative environmental impacts.

Conclusions. *The study confirms that a ship's life cycle is a complex source of anthropogenic impact, with the operational phase being the most critical in terms of environmental impact, as it accounts for the majority of emissions and waste. The proposed structural model of the life cycle and methodology for the quantitative assessment of operational emissions allow for the integration of data on all stages of a ship's operation, the identification of priority areas for reducing environmental impact, and the comparison of alternative technical and operational solutions. The results obtained can be used to develop environmentally effective maritime transport management strategies, optimize operational modes, plan routes, and enhance the efficiency of "green shipping," which is of great importance for the protection of marine ecosystems, improvement of air quality, and preservation of biodiversity in coastal zones.*

Key words: *vessel, life cycle, life cycle stages, environment, analysis, life cycle model, emission model, operation.*

Вступ

Проблема техногенного впливу морського транспорту на навколишнє середовище є предметом численних наукових досліджень. Морське судноплавство забезпечує значну частину світових перевезень, проте його функціонування супроводжується утворенням різних видів забруднення – атмосферних викидів, нафтових розливів, утворенням відходів та біологічним перенесенням інвазійних видів. У науковій літературі підкреслюється, що морський транспорт робить помітний внесок у формування техногенного навантаження на екосистеми Світового океану та прибережних зон.

У багатьох роботах було підкреслено, що у контексті сучасних екологічних викликів та переходу морської галузі до концепції «зеленого судноплавства» особливої уваги потребує оцінка впливу окремих етапів життєвого циклу судна на навколишнє середовище [1].

Так, Дж. Уільямс відносить транспортне судноплавство до тих видів людської діяльності, у результаті яких відбуваються забруднення. Він виділяє наступні види забруднення, які виникають від транспортного судноплавства: забруднення, яке виникає у зв'язку з днопоглиблювальними роботами, які проводяться з метою

підтримання необхідних для проходу суден глибин; забруднення нафтою; забруднення, спричинене будівельними роботами з метою ремонту або модернізації відповідного обладнання для вантажообробки суден у портах; побутові забруднення з суден тощо [2, с. 28–29].

Т.Р. Короткий забруднення морського середовища з суден розглядає таким чином: забруднення експлуатаційними скидами, забруднення у результаті захоронення та забруднення у результаті аварій [3, с. 51–78].

Фундаментальні питання впливу морського транспорту на довкілля розглянуті у класичних дослідженнях, присвячених проблемам морського забруднення, де визначено основні джерела техногенного впливу судноплавства на морські екосистеми та описано механізми формування забруднень у процесі експлуатації суден [4]. Подальший розвиток наукових досліджень у цьому напрямі пов'язаний з аналізом міжнародно-правових та організаційних механізмів запобігання забрудненню морського середовища. У роботах [5–7] значна увага приділяється питанням міжнародного регулювання екологічної безпеки морського транспорту та впровадженню нормативних вимог щодо зменшення шкідливих викидів і скидів із суден.

У дослідженнях [8–10] показано, що основними джерелами екологічної небезпеки морського транспорту є експлуатаційні скиди з суден, аварійні ситуації під час перевезення небезпечних вантажів, а також процеси списання та утилізації суден після завершення їх експлуатації. У зв'язку з цим значна увага приділяється розробленню комплексних підходів до оцінювання екологічного впливу судноплавства з урахуванням усіх етапів функціонування суден.

Одним із таких підходів є концепція оцінювання життєвого циклу технічних систем (Life Cycle Assessment, LCA), яка передбачає аналіз екологічного впливу об'єкта протягом усього періоду його існування – від стадії проектування та виробництва до завершальної стадії утилізації. Використання цього підходу дозволяє комплексно оцінити споживання матеріальних та енергетичних ресурсів, а також сумарні обсяги шкідливих викидів і відходів, що формуються протягом життєвого циклу технічної системи [11–16]. Застосування методології LCA до морських суден дає можливість визначити сукупний екологічний вплив їх функціонування та порівнювати альтернативні технічні рішення з точки зору їх екологічної ефективності.

Окремі елементи оцінювання життєвого циклу суден розглядаються у роботах, присвячених аналізу екологічних наслідків експлуатації морського флоту, використанню альтернативних видів суднового палива та вдосконаленню технологій утилізації суден. У дослідженнях [17–22] зазначається, що найбільший внесок у сумарні викиди, пов'язані з життєвим циклом судна, як правило, припадає саме на етап його експлуатації, тривалість якого може становити кілька десятиліть. Водночас значний екологічний вплив мають і інші стадії життєвого циклу, зокрема виробництво матеріалів для суднобудування, енергетичні витрати під час будівництва суден, а також процеси демонтажу та утилізації після завершення терміну їх служби.

Попри значну кількість досліджень у цій сфері, аналіз наукової літератури свідчить, що більшість робіт зосереджені на окремих елементах екологічного впливу

морського транспорту, тоді як комплексний аналіз життєвого циклу судна як системного джерела техногенного впливу на навколишнє середовище представлений недостатньо. Зокрема, потребує подальшого розвитку підхід до інтегрованого оцінювання впливу різних етапів життєвого циклу судна на навколишнє середовище, а також методи кількісного визначення внеску окремих режимів експлуатації судна у формування сумарних викидів.

Таким чином, існує наукова проблема, що полягає у необхідності систематизації екологічних факторів впливу суден на різних етапах їх життєвого циклу та розробленні підходу до кількісного оцінювання техногенного навантаження, яке формується під час експлуатації суден. Вирішення цієї проблеми дозволить підвищити ефективність екологічного управління у морській галузі та сприятиме обґрунтуванню заходів щодо зменшення негативного впливу судноплавства на довкілля.

Автори статті здійснили спробу розглянути життєвий цикл судна як фактор техногенного впливу на навколишнє середовище.

Метою дослідження є удосконалення підходу до аналізу життєвого циклу судна як джерела техногенного впливу на навколишнє середовище шляхом систематизації екологічних факторів на різних етапах його існування та формування підходу до оцінювання експлуатаційних викидів суден.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати основні етапи життєвого циклу судна та їх вплив на навколишнє середовище.
2. Виконати порівняльний аналіз впливу різних етапів життєвого циклу судна на навколишнє середовище.
3. Запропонувати структурну модель життєвого циклу судна з урахуванням екологічних факторів.

Основна частина

Екологічна проблема – це біль XX століття, яка ще більш загостреною перейшла у XXI століття. Глобалізація світової економіки, її стрімкий розвиток, що призвів до значного скорочення життєвого циклу (ЖЦ) складних технічних систем (суден), науково-технічний прогрес, інтенсивна господарська діяльність людства, пошук на морі та тотальний матеріалізм, воєнні дії негативним чином впливають на навколишнє середовище (НС). Ці явища проявляються у масовому суднобудівництві вантажних, пасажирських суден та воєнних кораблів, у активізації видобутку нафти і газу в просторах континентального шельфу, скидання в моря з суден нафтових і радіоактивних відходів, важких металів і різноманітного сміття, сільськогосподарських хімікатів, забруднення Світового океану через морські аварії, у т.ч. в результаті природних стихій та військових конфліктів.

За даними OECD та IEA [4, 5], викиди від морського транспорту зросли на 9,4 % з 2019 по 2024 рік. До теперішнього часу близько 90 % усієї енергії, що використовується цивілізацією для своїх потреб, виробляється за допомогою ДВЗ. При цьому, баланс забруднення довкілля ДВЗ у масштабах планети складає 50,4 %, з яких 4,1 % приходить на морський транспорт. 10–15 % площі поверхні Світового океану вже вкрито нафтовою плівкою, значна частина якої з'являється

саме через суднопластво. За статистичними даними, експлуатаційні та аварійні скиди морський транспорт складають ~12–15 %.

Техногенний вплив суден на екологічний стан зовнішнього повітряного та водного середовища можна розглядати як послідовність енергетичних перетворень та переходів. Якщо розглядати окремо взяте судно, то амплітудні значення поодиноких показників рівня впливу кожного виду генерованої енергії та речовини на НС здаватимуться мізерно малими. Ситуація докорінно змінюється у разі присутності в обмеженому за площею районі океану великої кількості суден.

Життєвий цикл судна складається з кількох основних етапів: концепція та планування, проектування та будівництво, експлуатація (включно з технічним обслуговуванням і ремонтом), оцінка, списання, та утилізація (переробка (рециклінг)) [6, с. 45–48].

Автори розглядають життєвий цикл судна, як послідовність взаємопов'язаних етапів, які відображають процес створення, функціонування та виведення судна з експлуатації. Кожний із цих етапів характеризується специфічними технологічними процесами, споживанням ресурсів та відповідним техногенним впливом на навколишнє середовище.

Автори пропонують відображення моделі життєвого циклу судна як послідовної системи стадій, що формують єдиний процес існування судна протягом усього періоду його служби. Такий підхід дозволяє врахувати часову послідовність етапів, їх взаємозв'язок та накопичувальний характер екологічного впливу



Рис. 1. Структурна модель життєвого циклу судна
Джерело: власна розробка авторів

Структурна модель життєвого циклу судна представлено у вигляді блок-схеми (рис. 1), яка відображає послідовний перехід від етапу формування концепції судна до завершальної стадії його утилізації. Такий підхід дозволяє наочно показати взаємозв'язок між окремими етапами життєвого циклу та визначити характер їх впливу на навколишнє середовище.

На кожному етапі життєвого циклу виникають специфічні джерела техногенного навантаження. Так, на стадії проектування закладаються конструктивні та технологічні рішення, що визначають рівень енергоефективності судна та обсяги майбутніх викидів. Етап «Будівництво і введення в експлуатацію» супроводжується значними витратами матеріальних та енергетичних ресурсів, а також утворенням виробничих відходів. Найбільш тривалим і екологічно значущим є етап «Експлуатація та ремонт судна», під час якого формуються основні атмосферні викиди, скиди забруднюючих речовин у водне середовище та утворюється значна кількість відходів. Завершальні етапи життєвого циклу («Оцінка

та списання», «Утилізація судна (рециклінг)») також можуть супроводжуватися суттєвими екологічними ризиками, пов'язаними з переробкою матеріалів, що містять токсичні речовини.

Основні характеристики етапів ЖЦ судна та їх вплив на екологію автори представили у вигляді порівняльної таблиці 1.

Таблиця 1

**Порівняльна таблиця характеристик етапів ЖЦ судна
та їх вплив на екологію**

Етапи ЖЦ судна	Цілі етапів ЖЦ судна	Вплив на навколишнє середовище (або рівень впливу на НС)
1	2	3
Концепція та планування (визначення вимог)	Визначення типу судна, його призначення та основних характеристик. Початкова концепція – розробка детальних планів судна, визначається його призначення, розміри, системи та функції. Обов'язково враховуються усі міжнародні норми та правила безпеки. Постановка завдання розрахунку вартості ЖЦ судна.	Вплив є мінімальним.
Проектування	Регламентування проектування та будівництва. Розробка детальної технічної документації, креслень та специфікацій. Проектування стратегії технічного обслуговування та ремонту. Визначення необхідної кількості змінно-запасних частин і ремонтних матеріалів. Проектування технологічного процесу будівництва. Певно, перелік представлених завдань, далеко не повний [7, с. 44-47].	На цьому етапі відбувається зменшення негативного впливу: – закладається дизайн судна, щоб форма корпусу, його шорткість сприяла зменшенню опору води та використанню екологічного палива. – розробляється Еко-дизайн.
Будівництво	На верфях відбувається фізичне втілення проекту. Закладка корпусу, зведення надбудов, встановлення обладнання та систем судна. Процес включає різання сталі, збирання секцій (блоків), їх фарбування, монтаж обладнання (двигунів, навігаційних систем, електрики, трубопроводів) та спуск судна на воду.	Високий вплив на НС: – потребує великої кількості металу, енергії, сировини, що призводить до виснаження природних ресурсів; – викиди від металургійних заводів при виробництві сталі, хімічні речовини, значний шум під час виробництва та збирання.
Експлуатація (ремонт і технічне обслуговування)	Протягом ЖЦ судно використовується за призначенням – для перевезення вантажів, пасажирів, риболовлі, оборони тощо. Цей етап супроводжується постійним та плановим технічним обслуговуванням, ремонтами (включаючи доковий ремонт) та модернізаціями для забезпечення його	Найвищий рівень впливу: – забруднення води: витіки нафтопродуктів, баластні води, зливи побутових відходів, що шкодять морській флорі та фауні; утворення стічних вод, використаних фільтрів та залишків фарби під час докування. – забруднення повітря.

Продовження таблиці 1

1	2	3
	працездатності, безпеки та відповідності мінливим нормам.	– шум (акустичне забруднення). – біологічне забруднення (скидання баластних вод). – хімікати. – суднові відходи [1].
Оцінка та списання судна	Техніко-економічна оцінка стану судна, прийняття рішення про його подальшу долю (продаж, переобладнання або утилізація)	Низький рівень впливу.
Утилізація. Переробка (Рециклінг)	Коли судно стає економічно невідповідним або фізично непридатним для подальшої експлуатації, воно виводиться з експлуатації та відправляється на утилізацію. На спеціалізованих верфях воно демонтується, а матеріали (наприклад, сталь, кольорові метали) переробляються відповідно до міжнародних стандартів охорони здоров'я, безпеки та НС.	Високий рівень впливу на НС. Токсичні матеріали: старі судна містять азбест, поліхлоровані біфеніли (ПХБ) та залишки важкого палива. «Чорна» утилізація – неконтрольована утилізація. Багато суден утилізуються на пляжах Південної Азії методом «бічінгу», що спричиняє масове забруднення ґрунту та води хімікатами, а також створює небезпечні умови для працівників. Якщо судно утилізовано методом затоплення, то старіння металевих конструкцій суден і погіршення стану листового металу створюють загрозу викиду вмісту у морську воду в результаті корозії.

Джерело: розроблено авторами за даними: [1–12]

Проведений аналіз засвідчив, що найбільший вплив на НС припадає на етап «Експлуатація (ремонт і технічне обслуговування)», тривалість якого в окремих випадках перевищує 40 років. У зв'язку з цим, у таблиці 2 наведено детальніший аналіз зазначеного етапу.

Таблиця 2

Вплив етапу експлуатації («Ремонт і технічне обслуговування») суден на екологію

Експлуатація (ремонт і технічне обслуговування)		
№	Вид забруднення та викидів	Наслідки забруднення та викидів
1	2	3
1	Витоки нафтопродуктів, баластні води, зливи побутових відходів, що шкодять морській флорі та фауні	Найчастіше із забрудненням суден пов'язані розливи нафти, які мають руйнівні наслідки. Поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАУ), які є компонентами сирої нафти, дуже токсичні для морських мешканців, але їх дуже важко очищати, вони зберігаються роками в осадках та морському середовищі. Морські види, які постійно зазнають впливу ПАУ, можуть виявляти проблеми з розвитком, сприйнятливості до хвороб та ненормальні репродуктивні цикли. Трюмна вода: на судні нафта часто витікає з машинного приміщення і змішується з водою в трюмі.

Продовження таблиці 2

1	2	3
		Хоча трюмну воду фільтрують і очищають перед скиданням, масло в навіть незначних концентраціях може вбити рибу або мати різні хронічні ефекти. Крім того, трюмна вода може містити тверді відходи та забруднюючі речовини. Очищення корпусу від біобросання може призводити до потрапляння важких металів (наприклад, міді) у прибережні води.
2	Утворення стічних вод, використаних фільтрів та залишків фарби під час докування	«Чорна» вода – це стічні води, з туалетів та медичних установ, які можуть містити шкідливі бактерії, патогени, віруси, кишкові паразити та шкідливі поживні речовини. Скидання нечищених або неадекватно очищених стічних вод може спричинити бактеріальне та вірусне забруднення рибного господарства, створюючи ризик для здоров'я населення. Такі поживні речовини у стічних водах, як азот та фосфор, сприяють надмірному цвітінню водоростей, яке споживає кисень у воді і може призвести до загибелі риби та знищення інших водних організмів. «Сіра» вода – це стічна вода з раковин, душових кабін, камбузів, пральні та очищення на борту судна. Він може містити різноманітні забруднюючі речовини, включаючи фекальні коліформи, миючі засоби, олію та жир, метали, органічні сполуки, нафтові вуглеводні, поживні речовини, харчові відходи, медичні та стоматологічні відходи.
3	Забруднення повітря	На морський транспорт припадає 3,5–4 % усіх викидів, пов'язаних із зміною клімату, насамперед вуглекислого газу (CO ₂). Забруднення повітря від суден зумовлене роботою дизельних двигунів, що спалюють паливо з високим вмістом сірки. У результаті утворюються діоксид сірки, оксиди азоту, тверді частинки, а також чадний і вуглекислий газ та вуглеводні, які сприяють формуванню аерозолів і вторинних забруднювачів, зокрема озону та формальдегіду. Вихлопи судових дизельних двигунів визнані ЕРА потенційно канцерогенними та такими, що негативно впливають на якість повітря, здоров'я населення й водні екосистеми.
4	Шум (акустичне забруднення)	Шум, який створюють морські судна, шкодить морським видам, які орієнтуються на звук для орієнтації, спілкування та харчування, і можуть постраждати від цього звукового забруднення. Крім того, звук спричиняє фізичну шкоду та може викликати сильну поведінкову реакцію.
5	Біологічне забруднення (скидання баластних вод)	Скидання баластної води містить різноманітні біологічні матеріали, включаючи рослини, тварин, віруси та бактерії. Ці матеріали включають немісцеві, інвазійні, екзотичні види, які можуть завдати значних екологічних та економічних збитків водним екосистемам. Перенесення інвазійних видів через баластні води руйнує місцеві екосистеми.
6	Хімікати	Використання фарб, розчинників, антикорозійних покриттів, що містять шкідливі речовини.
7	Відходи	Утворення значної кількості твердих побутових та промислових відходів (старі запчастини, фарби). Тверді відходи, які утворюються на судні, включають скло, папір, картон, алюмінієві та сталеві банки та пластмаси. Тверді відходи, що потрапляють у морське середовище, з часом перетворюються на морське сміття і становлять загрозу для морських екосистем, населення прибережних

Продовження таблиці 2

1	2	3
		<p>територій та видів діяльності, пов'язаних з використанням морів і океанів. На судах значна частина побутових твердих відходів може спалюватися на борту, однак утворений у результаті спалювання попіл відповідно до міжнародних вимог не допускається до скидання у море. Згідно з Додатком V Міжнародної конвенції з запобігання забрудненню з суден (MARPOL 73/78), попіл від судових інсинераторів належить до твердих відходів і має зберігатися на борту з подальшою передачею до берегових приймальних споруд для утилізації або переробки. Потрапляння такого попелу у НС все ж таки можливе, а пластмаси та інші тверді відходи, у разі потрапляння в морське середовище, можуть спричинити травмування або загибель морських ссавців, риб, морських черепах і птахів унаслідок заплутування чи заковтування.</p> <p>Автори звернули увагу на круїзні судна. Хоча вони складають лише незначну частину світового флоту судноплавства, але викиди круїзних суден можуть мати значний вплив у місцевому масштабі в певних прибережних районах, які відвідують неодноразово. Судноспалювальні установки які спалюють великі обсяги сміття, пластмас та інших відходів, також викидають токсичні викиди.</p> <p>На великому круїзному судні під час одностороннього круїзу утворюється близько 8 тонн твердих побутових відходів. За підрахунками, 24 % твердих відходів, що утворюються суднами у всьому світі, надходять з круїзних суден.</p>

Джерело: розроблено авторами за даними: [1–14]

З проведеного аналізу авторами зроблено висновок, що у процесі експлуатації, ремонту та технічного обслуговування суден формується комплексний негативний вплив на морське середовище й атмосферу, зумовлений нафтозабрудненнями, скиданням льяльних, стічних і баластних вод, атмосферними викидами, шумом та утворенням значної кількості відходів. Найбільш небезпечними є нафтові вуглеводні, важкі метали, патогенні мікроорганізми та інвазійні види, які здатні накопичуватися в екосистемах, порушувати біологічні процеси й спричинити довготривалі екологічні та соціально-економічні наслідки. Суднові викиди в атмосферу роблять суттєвий внесок у зміну клімату, погіршення якості повітря та здоров'я населення, особливо в прибережних і портових районах, тоді як акустичне забруднення негативно впливає на морські організми. Особливу екологічну загрозу становлять круїзні судна через високі обсяги відходів і локальну концентрацію впливу, що зумовлює необхідність суворого дотримання міжнародних екологічних вимог і впровадження ефективних заходів з мінімізації шкоди довкіллю.

На основі узагальнених даних, наведених у таблиці 2, побудовано блок-схему взаємодії судна з НС (рис. 2), яка відображає основні напрями техногенного впливу судна на водне та повітряне середовище в процесі його експлуатації. Запропонована схема дозволяє візуалізувати взаємозв'язок між джерелами забруднення, видами викидів і екологічними наслідками, а також може бути використана як основа для подальшого екологічного моделювання та обґрунтування заходів з мінімізації негативного впливу.



Рис. 2. Блок-схема взаємодії судна з навколишнім середовищем
Джерело: розроблено авторами

Автори статті не брали до уваги вплив акустичного поля (шум від силових установок, механізмів, гвинтів, тощо), магнітного поля (випромінювання від навігаційних приладів), електричного поля (від роботи енергетичного обладнання), теплового поля (виброси високотемпературних газів), незначний радіаційний вплив та це, не применшує вплив цих факторів на НС.

Для кількісної оцінки техногенного впливу судна на НС на етапі експлуатації запропоновано підхід, що ґрунтується на поділі експлуатаційного процесу на окремі ділянки маршруту з різними умовами руху та режимами роботи суднової енергетичної установки. Для кожної такої ділянки враховуються обсяги спожитого палива та відповідні емісійні коефіцієнти основних забруднюючих речовин. Це дозволяє визначити внесок окремих режимів експлуатації у формування сумарних викидів судна та створює передумови для оптимізації маршрутів і режимів руху з екологічної точки зору.

Найбільш суттєвим внеском у загальний екологічний вплив є викиди, що утворюються під час експлуатації судна. Вони залежать від споживання палива, технічних параметрів двигуна і тривалості роботи [15; 16].

Практичне застосування такого підходу є доцільним при порівнянні альтернативних маршрутів, виборі типу палива або оцінюванні ефективності заходів з підвищення енергоефективності суден.

Автори пропонують використовувати під час експлуатації модель викидів [17]:

$$E_{\text{експл.}} = \sum_{i=1}^n (FC_i \times EF_i), \quad (1)$$

$$E_{\text{operation}} = \sum_{i=1}^n (FC_i \times EF_i), \quad (2)$$

де FC_i – споживання палива на i -тій ділянці маршруту (т/дизель тощо);

EF_i – емісійний коефіцієнт для відповідного виду палива і показника (наприклад, CO_2 , NO_x , SO_x);

n – кількість розглянутих сегментів маршруту.

Ця модель дозволяє розрахувати вклад кожної ділянки експлуатації у загальні викиди, що важливо для оптимізації маршрутів і дистанцій.

Модель сумарних викидів ЖЦ *Total Life Cycle Emission Model* (TLCEM) інтегрує дані про матеріали, використане паливо та енергетичні витрати для розрахунку загальних викидів за весь ЖЦ. Основна формула такого моделювання включає вагові коефіцієнти для кожної категорії впливу, що дозволяє пріоритизувати заходи з мінімізації навантаження [17].

Запропонована модель оцінювання експлуатаційних викидів вписується в загальну концепцію життєвого циклу судна, оскільки дозволяє кількісно охарактеризувати екологічний вплив одного з найбільш тривалих і екологічно навантажених етапів ЖЦ. Отримані оцінки можуть бути використані як вхідні дані для інтегральної оцінки сумарного техногенного впливу судна протягом усього життєвого циклу, а також для порівняння альтернативних технічних та експлуатаційних рішень.

Висновки.

У результаті проведеного дослідження проаналізовано особливості життєвого циклу судна як складної технічної системи, що протягом усього періоду свого існування здійснює техногенний вплив на навколишнє середовище. Встановлено, що кожний етап життєвого циклу судна характеризується специфічними джерелами екологічного навантаження, які пов'язані зі споживанням енергетичних та матеріальних ресурсів, утворенням відходів і формуванням атмосферних викидів.

У роботі систематизовано основні етапи життєвого циклу судна та запропоновано їх представлення у вигляді структурної моделі, що відображає послідовність переходу від стадії формування концепції судна до завершального етапу його утилізації. На відміну від традиційного описового підходу, така модель дозволяє врахувати часову послідовність етапів, їх взаємозв'язок та накопичувальний характер екологічного впливу.

Показано, що найбільш тривалим і екологічно значущим етапом життєвого циклу є експлуатація судна, під час якої формується основна частина атмосферних викидів та інших видів техногенного навантаження. У зв'язку з цим особливу увагу приділено оцінюванню експлуатаційних викидів судових енергетичних установок.

Запропоновано підхід до оцінювання експлуатаційних викидів суден, який ґрунтується на поділі маршруту на окремі ділянки з різними режимами роботи енергетичної установки. Такий підхід дозволяє більш точно визначати сумарні обсяги викидів залежно від умов експлуатації судна та режимів його руху.

Перспективи подальших досліджень полягають у розвитку запропонованої моделі шляхом урахування більшої кількості експлуатаційних факторів, зокрема типу судна, характеристик енергетичної установки, метеорологічних умов та особливостей режимів руху, що дозволить підвищити точність оцінювання техногенного впливу морського транспорту на навколишнє середовище.

ЛІТЕРАТУРА

1. Environmental impact of shipping [Electronic resource]. URL: https://handwiki.org/wiki/Earth:Environmental_impact_of_shipping (дата звернення: 10.01.2026).
2. Williams J. Fundamentals of Marine Pollution Control. London, 1984. 129 p. URL: https://odaba.edu.ua/upload/files/11._Ekologichniy_impuls.pdf (дата звернення: 15.01.2026).
3. Короткий Т. Р. Міжнародно-правова охорона морського середовища від забруднення з суден : монографія. Одеса : Латстар, 2002. 200 с. ISBN 966-7553-96-5.
4. OECD statistics [Electronic resource]. URL: <https://www.statista.com/map/oecd/> (дата звернення: 10.01.2026).
5. S&P Global Energy. Eurasia's Energy Intelligence [Electronic resource]. URL: <https://energy.spglobal.com/eurasia/oil-gas> (дата звернення: 17.01.2026).
6. Пізінцалі Л. В. Методологічні основи організаційних процесів утилізації суден : монографія. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2021. 308 с. ISBN 978-966-289-488-2.
7. Забезпечення екологічної безпеки судноплавства : монографія / В.Е. Леонов, О.В. Соляков, П.Г. Хімич, В.Ф. Ходаковський ; за ред. В.Е. Леонова. Херсон : ХГМА, 2014. 188 с. ISBN 978-617-7170-04-3.
8. Міжнародна конвенція по запобіганню забрудненню з суден 1973 року [Electronic resource]. База даних «Законодавство України». URL: http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/896_009 (дата звернення: 17.01.2026).
9. Пізінцалі Л.В., Шумило О.М., Александровська Н.І. та ін. Вплив утилізації суден методом затоплення на екологію та безпеку судноплавства. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2022. № 1. doi: 10.15589/znr2022.1 (488).1.
10. Александровська Н.І., Россомаха О.І., Пізінцалі Л.В. та ін. Судноремонт та утилізація: екологічні виклики затонулих суден України. *Вісник Одеського національного морського університету*. 2025. № 75. С. 122–143. doi: 10.47049/2226-1893-2025-1-122-143.
11. Пізінцалі Л. В., Александровська Н. І., Россомаха О. І. та ін. Аналіз затоплених та кинутих суден в Україні: вплив на екологічну безпеку прибережних морських акваторій і берегових зон. *Дніпровські читання-2024 : V міжнар. наук.-практ. конф. : матеріали*. Київ, 2024. С. 234–240. doi: 10.33298.
12. Баластні води [Electronic resource]. Енциклопедія сучасної України. URL: <https://esu.com.ua/article-41175> (дата звернення: 15.01.2026).
13. Побутові відходи, що утворюються на судні [Electronic resource]. *Офіційний портал Верховної Ради України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/term> (дата звернення: 17.01.2026).
14. Про вплив низькочастотних акустичних коливань на морське середовище [Electronic resource]. Інститут гідромеханіки НАН України. URL: <https://hydromech.org.ua/content/pdf> (дата звернення: 20.01.2026).

15. Assessing Environmental Impacts of Ships from a Life Cycle Perspective [Electronic resource]. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/280313109_Assessing_Environmental_Impacts_of_Ships_from_a_Life_Cycle_Perspective (дата звернення: 24.01.2026).
16. Parametric Trend Life Cycle Assessment of Ships [Electronic resource]. Springer. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-022-02091-4> (дата звернення: 25.01.2026).doi: 10.1007/s11367-022-02091-4.
17. Total Life Cycle Emission Model (TLCEM). *Journal of the Air & Waste Management Association* [Electronic resource]. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10962247.2018.1505675> doi: 10.1080/10962247.2018.1505675 (дата звернення: 20.01.2026).

REFERENCES

1. Environmental impact of shipping. (n.d.). Retrieved January 27, 2026, from https://handwiki.org/wiki/Earth:Environmental_impact_of_shipping [in English].
2. Williams, J. (1984). *Fundamentals of marine pollution control*. London. Retrieved January 27, 2026, from https://odaba.edu.ua/upload/files/11._Ekologichniy_impuls.pdf [in English].
3. Korotkyi, T. R. (2002). International legal protection of the marine environment from ship-source pollution [Mizhnarodno-pravova okhrona morskoho seredovyscha vid zabrudnennia z suden]. Odesa: Latstar [in Ukrainian].
4. OECD statistics. (n.d.). Retrieved January 27, 2026, from <https://www.statista.com/map/oecd/> [in English].
5. Eurasia's energy intelligence. (n.d.). S&P Global Energy. Retrieved January 27, 2026, from <https://energy.spglobal.com/eurasia/oil-gas> [in English].
6. Pizintsali, L. V. (2021). Methodological foundations of organizational processes of ship recycling [Metodolohichni osnovy orhanizatsiinykh protsesiv utylizatsii suden]. Kherson: OLDI-PLIuS [in Ukrainian].
7. Leonov, V.E. (Ed.), Soliakov, O.V., Khimich, P.H., & Khodakovskiy, V.F. (2014). Ensuring environmental safety of navigation [Zabezpechennia ekolohichnoi bezpeky sudnoplavstva]. Kherson: KhSMA [in Ukrainian].
8. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973 (MARPOL). (1973). Retrieved January 27, 2026, from http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/896_009 [in Ukrainian].
9. Pizintsali, L.V., Shumylo, O.M., Aleksandrovska, N.I., et al. (2022). Impact of ship disposal by sinking on ecology and navigation safety [Vplyv utylizatsii suden metodom zatoplennia na ekolohiiu ta bezpeku sudnoplavstva]. Proceedings of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, (1). doi:10.15589/znp2022.1 (488).1 [in Ukrainian].
10. Aleksandrovska, N.I., Rossomakha, O.I., Pizintsali, L.V., et al. (2025). Ship repair and recycling: Environmental challenges of sunken ships of Ukraine [Sudnoremont ta utylizatsiia: ekolohichni vyklyky zatonulykh

- suden Ukrainy]. *Bulletin of the Odessa National Maritime University*, (75), 122–143. doi:10.47049/2226-1893-2025-1-122-143 [in Ukrainian].
11. Pizintsali, L.V., Aleksandrovskya, N.I., Rossomakha, O.I., et al. (2024). Analysis of sunken and abandoned ships in Ukraine: Impact on environmental safety of coastal marine areas and coastal zones [Analiz zatoplenykh ta kynutykh suden v Ukraini: vplyv na ekolohichnu bezpeku pryberezhnykh morskyykh akvatorii i berehovykh zon]. In *Dnipro Readings 2024: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference* (pp. 234–240). Kyiv. doi:10.33298 [in Ukrainian].
 12. Ballast waters. (n.d.). Encyclopedia of Modern Ukraine. Retrieved January 27, 2026, from <https://esu.com.ua/article-41175> [in Ukrainian].
 13. Household waste generated on board a ship. (n.d.). Official Portal of the Verkhovna Rada of Ukraine. Retrieved January 27, 2026, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/term> [in Ukrainian]
 14. On the impact of low-frequency acoustic oscillations on the marine environment. (n.d.). Institute of Hydromechanics of NAS of Ukraine. Retrieved January 27, 2026, from <https://hydromech.org.ua/content/pdf> [in Ukrainian].
 15. Assessing environmental impacts of ships from a life cycle perspective. (n.d.). ResearchGate. Retrieved January 27, 2026, from https://www.researchgate.net/publication/280313109_Assessing_Environmental_Impacts_of_Ships_from_a_Life_Cycle_Perspective [in English].
 16. Parametric trend life cycle assessment of ships. (2022). *The International Journal of Life Cycle Assessment*. doi:10.1007/s11367-022-02091-4 [in English]
 17. Total life cycle emission model (TLCEM). (2018). *Journal of the Air & Waste Management Association*. doi:10.1080/10962247.2018.1505675 [in English].

Дата першого надходження статті до видання: 22.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 26.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

**MICROSTRUCTURAL EVOLUTION
AND GRADIENT NANOSTRUCTURATION OF THE SURFACE
OF PARTS UNDER THE INFLUENCE OF SHOT BLASTING**

O.V. Fomin¹, O.V. Burlutskyi², M.V. Khara³, A.S. Krasulin⁴

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Railway Cars and Structures, Kyiv Institute of Railway Transport,
National Transport University, Kyiv, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-2387-9946

²PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Computer Modelling and Integrated Pressure Treatment Technologies,

National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute', Kharkiv, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-1902-5809

³Ph.D, Associate Professor, Department Transport technologies of enterprises

Pryazovskyi State Technical University, Dnipro, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-6818-7938

⁴Senior lecturer, of Transport technologies of enterprises

Pryazovskyi State Technical University, Mariupol, Ukraine

ORCID ID: 0000-0001-8919-3264

Summary

Introduction. *Enhancing the operational characteristics and service life of machine-building parts is a key task. An effective method of surface hardening is shot blasting, which is based on the phenomenon of cold plastic deformation of the subsurface layer caused by the impact of a stream of shot. This leads to the formation of a gradient nanostructured layer. To controllably achieve specified layer characteristics, a quantitative model linking technological parameters with material properties is required. The development of such a model is a relevant scientific and applied problem.*

Purpose of the study. *The aim of the study is to establish the conditions for the formation of a nanostructured layer, which is formed by cold plastic deformation of the surface during shot blasting of machine-building parts.. The study aims to establish the relationships between technological parameters (pressure, shot size, impact angle), mechanical properties of the material (yield strength), and the resulting thickness of the nanostructured zone, based on the solution of the contact problem of elasticity theory.*

Results. *Based on the solution of the Boussinesq problem, analytical expressions for the stress-strain state in the subsurface layer were obtained. The Mises yield criterion was applied to describe the transition to the plastic deformation state. By combining the solution of the contact problem with the plasticity condition, a basic formula for the thickness of the plastic deformation zone (nanostructured layer) was derived. Taking into account the momentum transfer mechanism made it possible to relate the impact force to technological parameters: pressure (p_0), shot radius (R), and impact angle (α). The final calculation dependence was obtained: $\delta = R \sqrt[3]{(2/3) (p_0 \sin \alpha / \sigma_m)}$, where σ_m is the yield strength.*



Based on the model, a numerical analysis was carried out for typical processing conditions. The dependence of the layer thickness δ was calculated for materials with a yield strength of 200–1600 MPa at a pressure of 0.1–0.5 MPa, a shot radius of 0.1 mm, and an impact angle of 30°. The results are presented in a table and a graph. The analysis showed that the layer thickness ranges from ~4.6 to 28.9 μm . It was established that the layer thickness is inversely proportional to $\sqrt{\sigma_m}$ and directly proportional to $\sqrt{p_0}$. For stronger materials, more intensive processing regimes are required. The results are consistent with experimental data on hardening depth. **Conclusions.** A theoretical model for predicting the thickness of a gradient nanostructured layer after shot blasting has been proposed, based on continuum mechanics. The obtained analytical dependence provides a practical tool for selecting processing regimes to achieve a specified nanostructuring depth, taking into account the material properties. The model demonstrates that the process is controllable, and its parameters can be optimized to maximize the hardening effect. This opens up possibilities for creating surface layers with increased fatigue strength, hardness, and wear resistance, which is crucial for improving the durability of critical parts in machine building, aviation, and transport. The approach can serve as a basis for developing digital tools for process optimization.

Key words: shot peening, gradient nanostructured layer, analytical model, yield strength, plastic deformation, contact problem, theoretical prediction, hardening thickness, railway carriage.

МІКРОСТРУКТУРНА ЕВОЛЮЦІЯ ТА ГРАДІЄНТНА НАНОСТРУКТУРИЗАЦІЯ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ ПІД ВПЛИВОМ ДРОБЕСТРУЙНОЇ ОБРОБКИ

О.В. Фомін¹, О.В. Бурлуцький², М. В. Хара³, О.С. Красулін⁴

¹д.т.н., професор, професор кафедри «Вагони та вагонні споруди»,
Освітньо-науковий Київський інститут залізничного транспорту, Національний
транспортний університет, Київ, Україна

ORCID ID: 0000-0003-2387-9946

²к.т.н., доцент кафедри комп'ютерного моделювання
та інтегрованих технологій обробки тиском,

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
Харків, Україна

ORCID ID: 0000-0003-1902-5809

³Доктор філософії (Ph.D), доцент, кафедра «Транспортні технології підприємств»
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Дніпро, Україна

ORCID ID: 0000-0002-6818-7938

⁴старший викладач, кафедра «Транспортні технології підприємств»

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Дніпро, Україна

ORCID ID: 0000-0001-8919-3264

Анотація

Вступ. Підвищення експлуатаційних характеристик та ресурсу деталей машинобудування є ключовим завданням. Ефективним методом поверхневого зміцнення є дробоструминна обробка, що ґрунтується на явищі холодної пластичної деформації приповерхневого шару від удару потоком дробини. Це призводить до формування градієнтного наноструктурованого шару. Для керованого

отримання заданих характеристик шару необхідна кількісна модель, яка пов'язує технологічні параметри з властивостями матеріалу. Розробка такої моделі є актуальним науково-прикладним завданням.

Мета дослідження є встановлення умов утворення наноструктурованого шару, що формується за рахунок холодної пластичної деформації поверхні під час дробоструминної обробки деталей машинобудування. Дослідження спрямоване на встановлення залежностей між технологічними параметрами (тиск, розмір дробини, кут падіння), механічними властивостями матеріалу (межа плинності) та результуючою товщиною зони наноструктурування на основі розв'язку контактної задачі теорії пружності.

Результати. На основі розв'язку задачі Буссінеска отримано аналітичні вирази для напружено-деформованого стану в приповерхневому шарі. Для опису переходу в стан пластичної деформації застосовано критерій пластичності Мізеса. Шляхом комбінації розв'язку контактної задачі з умовою пластичності виведено базову формулу для товщини шару пластичних деформацій. Врахування механізму передачі імпульсу дозволило пов'язати силу удару з технологічними параметрами: тиском (p_0), радіусом дробини (R) та кутом падіння (α). Отримано кінцеву розрахункову залежність: $\delta = R \sqrt[3]{(2/3) (p_0 \sin \alpha / \sigma_m)}$, де σ_m – межа плинності.

На підставі моделі проведено чисельний аналіз для типових умов. Розраховано залежність товщини шару δ для матеріалів із межею плинності 200–1600 МПа при тиску 0.1–0.5 МПа, радіусі дробини 0.1 мм та куті падіння 30°. Результати представлено у таблиці та на графіку. Аналіз показав, що товщина шару знаходиться в межах ~4.6–28.9 мкм. Встановлено, що товщина шару обернено пропорційна $\sqrt[3]{\sigma_m}$ та прямо пропорційна $\sqrt[3]{p_0}$. Для більш міцних матеріалів потрібні інтенсивніші режими обробки. Результати узгоджуються з експериментальними даними щодо глибини зміцнення.

Висновки. Запропоновано теоретичну модель для прогнозування товщини градієнтного наноструктурованого шару після дробоструминної обробки на основі механіки суцільного середовища. Отримана аналітична залежність надає практичний інструмент для вибору режимів обробки з метою досягнення заданої глибини наноструктурування з урахуванням властивостей матеріалу. Модель демонструє, що процес є керованим, а його параметри можуть бути оптимізовані для максимізації ефекту зміцнення. Це відкриває можливості для створення поверхневих шарів із підвищеною втомною міцністю, твердістю та зносостійкістю, що є ключовим для підвищення довговічності критичних деталей у машинобудуванні, авіації та транспорті. Підхід може бути основою для розробки цифрових інструментів оптимізації технології.

Ключові слова: дробоструминна обробка, градієнтний наноструктурований шар, аналітична модель, межа плинності, пластична деформація, контактна задача, теоретичний прогноз, товщина зміцнення, вагон.

Introduction

Modern mechanical engineering requires constant improvement of the performance characteristics of machine parts. One of the most effective methods of surface hardening is shot blasting [1].

During operation, under the influence of external loads, damage accumulates in the details of the wagons.[2] This leads to their loss of performance and destruction. To prevent such problems, modern mechanical engineering uses various approaches: constructive, technological and preventive.

Constructive method aimed at preventing defects. These include: the use of vibration dampers, designing parts with optimal geometric parameters, increasing the rigidity of supports, etc.

Preventive (operational) method include regular inspections to detect damage, timely replacement of worn components, and other equipment maintenance measures.

Studies of the causes of part failure show that most of them are fatigue failures. Such failures often begin in stress concentration zones. Therefore, among the technological methods, the most effective are those that reduce fatigue:

1. Elimination or reduction of technological stress concentrators (e.g., burn-ins during grinding, hardening cracks).
2. Balancing of rotating parts.
3. Application of thermal (surface hardening) and chemical-thermal (nitriding) hardening.

Using surface plastic deformation (forging) methods, which significantly increase the fatigue strength of parts.

Topicality is driven by the need to create highly reliable components for the aviation and space industries. The surface layers of parts are the most vulnerable to fatigue failure and corrosion.

Shot blasting allows initiating plastic deformation processes at the micro level. The microstructural evolution during processing determines the physical and mechanical properties of the product.

The formation of a gradient structure provides a smooth transition of properties from the surface to the core. Nanostructuring of the surface layer significantly increases the hardness of the material. The use of nanostructured materials allows to reduce the mass of structures without loss of strength. Research into grain grinding mechanisms is key to controlling surface quality. Traditional strengthening methods often do not provide the required depth of the modified layer. Shot blasting is an environmentally safe and economically viable process. Understanding the kinetics of structural changes allows you to optimize the parameters of the technological process.

The high-energy impact of the shot causes a significant accumulation of deformation energy. This leads to the formation of dislocation substructures and grain fragmentation. It is relevant to study the influence of the velocity and angle of attack of the shot on the surface morphology. The gradient structure helps to effectively redistribute internal stresses. Residual compressive stresses arising during processing inhibit the development of cracks. The study of the evolution of phase composition during deformation is critically important.

Nanostructuring helps increase wear resistance under friction conditions. Under cyclic loading conditions, gradient layers demonstrate higher durability. There is a need to develop new models for predicting the state of the microstructure. Digital transformation of production requires accurate data on the state of the surface after processing. Studying the influence of the shot material on the cleanliness of the surface is a relevant

applied task. Increasing corrosion resistance by changing the surface energy is a promising direction. The nanostructuring process depends on the initial state of the metal or alloy. It is necessary to establish the limits of strain hardening for different steel grades. Shot blasting can replace expensive chemical-thermal hardening methods. It is important to analyze the surface roughness and its effect on the hydrodynamic characteristics of parts. Microstructural evolution is accompanied by a change in crystallographic texture. The study of the stability of nanostructures at elevated temperatures is critical. The implementation of the research results will allow to extend the service life of equipment. The relevance is enhanced by the need for import substitution of advanced strengthening technologies. The development of methods for non-destructive testing of gradient layers is an important part of the work. The impact of multiple shot impacts creates a specific stress state. Nanostructuring “in-situ” during processing opens up new opportunities for materials science. The study of diffusion processes in nanostructured layers is relevant for protective coatings.

Processing of complex-shaped parts requires precision equipment adjustment. Comparative analysis of pneumatic and ultrasonic shot blasting is relevant. Reducing energy consumption while maintaining the quality of nanostructuring is an important task. Mathematical modeling of the dynamic impact of a fraction on a crystal lattice needs to be developed. Optimization of the fraction size allows for maximum nanolayer depth. The influence of the processing environment on the microstructure also requires detailed study. The transition from micro- to nano-grain sizes radically changes the physics of fracture. The relevance is confirmed by the growing demand for high-strength welded structures. Shot blasting of welds improves their fatigue strength through nanostructuring. The study will allow creating a database of optimal modes for different materials. The evolution of the microstructure directly correlates with the reliability of friction units. Scientific justification of processing modes instead of empirical selection is the need of the hour. This study is a significant contribution to the development of modern functional materials science.

Analysis of information sources on the topic under study. In [3], the influence of warm shot blasting on the formation of a gradient nanostructure in the magnesium alloy Mg-8Gd-3Y-0.4Zr was investigated. It was shown that the increased treatment temperature promotes more intense plastic deformation and activation of dynamic recrystallization in the near-surface layer. As a result, a pronounced gradient of the grain structure is formed from nanocrystalline on the surface to coarse-grained in the bulk. The authors established an increase in compressive residual stresses and their greater stability compared to cold shot blasting. The results obtained confirm the prospects of warm shot blasting for increasing the fatigue life of light alloys.

The article [4] is devoted to the study of cryogenic traditional shot peening of austenitic stainless steel AISI 304. It is shown that a decrease in the treatment temperature intensifies the mechanisms of deformation twinning and martensitic transformation. A deep strengthening gradient with a high density of dislocations and nanocrystalline grains is formed in the near-surface layer. The authors note a significant increase in microhardness and the level of compressive residual stresses. The work demonstrates the effectiveness of cryogenic shot peening for controlling the structure and properties of steels.

In the publication [5], the formation of nanocrystalline surface structures in SS304 steel as a result of intensive shot peening was analyzed. It was found that severe shot peening provides extreme degrees of plastic deformation, which lead to significant grain refinement. A clearly expressed structural gradient and a significant change in the phase composition of the near-surface layer are observed. Mechanical properties, in particular hardness and wear resistance, increase significantly. The work emphasizes the relationship between processing parameters, microstructure evolution and operational characteristics.

The study [6] is devoted to the influence of laser impact hardening on the microstructural evolution of the heat-resistant alloy IN718. It is shown that laser impact loading forms a deep gradient of a plastically deformed layer with high compressive residual stresses. Grain refinement and an increase in the density of dislocations were detected in the near-surface zone. The resulting structural changes lead to an improvement in the strength and fatigue properties of the material. The authors justify the feasibility of using laser impact hardening for critical parts of aviation and energy applications.

In the article [7] the influence of ultrasonic shot blasting on titanium alloy Ti-6Al-4V is considered. It is shown that high-frequency shock loading provides intensive plastic deformation of the near-surface layer. A gradient structure with ultrafine and nanocrystalline grains is formed near the surface. The author notes an increase in microhardness and improvement in fatigue resistance. The work confirms the effectiveness of ultrasonic shot blasting for titanium alloys operating under cyclic conditions.

The publication [8] is of a general nature and is devoted to shot blasting of stainless steels with an emphasis on microstructural control methods. The main mechanisms of formation of hardened surface layers and gradient structures are considered. The author analyzes the possibilities of using modern microscopy methods for monitoring the surface condition after treatment. It is shown that microstructural parameters can be effective indicators of the quality of shot blasting. The work is useful for the development of methods for non-destructive assessment of the results of surface hardening.

In the article [9], a comparative analysis of different shot blasting methods for austenitic stainless steels was conducted. Their influence on residual stresses and the evolution of the microstructure of surface layers was studied. It was shown that different technologies form gradient structures that differ in depth and intensity. The author notes the key role of compressive residual stresses in increasing fatigue life. The work allows for a reasonable choice of processing technology depending on the requirements for operational properties.

The study [10] combines experimental and numerical methods for analyzing the evolution of the gradient microstructure in a high-strength alloy during shot peening. A model of the distribution of strains and stresses in the near-surface layer is constructed. The modeling results are in good agreement with experimental observations of the structure. The mechanisms of formation of nanocrystalline zones and transition layers are shown. The work demonstrates the importance of numerical modeling for predicting the results of surface hardening.

In the article [11] the application of gradient intensive shot peening for additively manufactured AlSi10Mg alloy was investigated. It was shown that the treatment effectively compensates for the structural heterogeneity characteristic of additive technologies.

A nanocrystalline structure with a significant increase in hardness is formed in the surface layer. A significant improvement in the fatigue strength of the material was established. The work emphasizes the prospects of shot peening as a post-process technology for additive manufacturing.

The publication [12] is devoted to the mechanisms of gradient nanostructure formation in the GH4169 alloy under the action of ultrasonic surface rolling. The authors analyze in detail the sequence of structural transformations from dislocation structures to nanocrystals. A clear dependence between the processing modes and the depth of the hardened layer is revealed. The formed structure provides increased strength and fatigue resistance. The work makes a significant contribution to the understanding of the physical mechanisms of gradient nanostructuring of surfaces.

The analysis of scientific literature has shown that, despite a significant number of works in the field of surface hardening, insufficient attention has been paid to the issues of microstructural evolution and gradient nanostructuring in shot blasting. Most publications focus on macroscopic parameters, such as roughness and overall hardness, leaving out of consideration the deep mechanisms of crystal lattice transformation. There is a lack of systematic data on the regularities of nanograin formation depending on the intensity of the shot energy flow. Literature sources do not sufficiently cover the issue of thermal stability of the obtained gradient structures under operating conditions. Theoretical models linking the parameters of dynamic contact with the parameters of microstructural fragmentation remain insufficiently developed. There is also a lack of information on the influence of combined processing modes on the evolution of packing defects. Thus, there is a scientific need for a deeper study of gradient nanostructuring to expand the capabilities of shot blasting technology.

The current state of technology requires materials with extreme performance properties, which are often determined by the surface condition. The main problem is the discrepancy between the potential capabilities of metal alloys and the real durability of parts due to premature surface failure. Shot blasting is traditionally used for strengthening, but the processes of forming nanoscale structures in the gradient layer remain poorly controlled. The problem lies in the lack of clear correlations between the parameters of the dynamic impact of the shot and the mechanisms of microstructural evolution. There is a difficulty in ensuring the homogeneity of the nanostructured layer on surfaces of complex geometry. The role of the initial texture of the material in the processes of intense plastic deformation remains uncertain. In addition, there is a contradiction between the need for high impact energy for nanostructuring and the risk of over-hardening and the appearance of microcracks. The lack of instrumental methods for operational control of the depth of the gradient layer complicates the implementation of the technology. Another problem is the limited knowledge about the degradation of gradient structures under the influence of long-term loads. The need to address these issues necessitates a comprehensive study of microstructural transformations. Solving this problem will allow us to proceed to the design of parts with a given functional gradient of properties.

Research methods. A set of modern analysis methods was used to study the microstructural evolution. Scanning electron microscopy was used to study the surface

morphology and fine structure of the gradient layer. X-ray structural analysis allowed determining the phase composition, the level of microstresses and the sizes of coherent scattering regions. Transmission electron microscopy was used for direct visualization of nanograins and dislocation substructures. Microhardness measurements by the Vickers method were carried out to construct depth hardening profiles. Statistical processing of the results and process modeling were performed using specialized software.

Research object are the processes of microstructural changes and the formation of gradient states in the surface layers of metal parts during shot blasting. The subject of the study is the regularities of microstructural evolution, nanostructuring parameters, distribution of phases, stresses and properties along the depth of the modified layer. The study covers the relationship between the processing modes and the final structural state of the material. The physical phenomena occurring at the grain boundaries in the process of intense dynamic impact are analyzed.

The purpose of the work there are establishing the conditions for the formation of a nanostructured layer formed by cold plastic deformation of the surface during shot blasting of mechanical engineering parts.

The research is aimed at developing scientifically based hardening regimes that ensure maximum operational reliability of parts. The end result is the creation of technological recommendations for obtaining stable nanostructured states with an improved set of physical and mechanical properties.

Research objectives:

1. To analyze modern ideas about the mechanisms of nanostructuring of metals during high-speed deformation.
2. To investigate the influence of energy parameters of shot blasting on the depth and degree of grain structure grinding. To study the dynamics of dislocation density changes and the evolution of subgrain boundaries in the gradient layer.
3. To establish the dependence of the phase composition and crystal lattice parameters on the intensity of processing.
4. To assess the effect of gradient nanostructuring on microhardness indicators and residual stress distribution.
5. To investigate the corrosion resistance and wear resistance of samples with formed nanostructured layers.
6. To develop a mathematical model for predicting the characteristics of the gradient layer depending on the parameters of the technological process.

Presentation of the main material.

Formation of a nanostructured layer by shot blasting.

As shown in the study [14], the improvement of the operational characteristics of parts after shot peening is associated with the formation of a nanostructured layer on the surface. This process occurs as a result of the impact of a stream of spherical particles on the surface of a metal part at high speed, which causes intense cold plastic deformation in a thin near-surface layer. Nanostructuring is understood as the formation of a stable structure with a grain size from tens of nanometers to tens of micrometers. It is this phenomenon that explains the complex of positive effects of shot peening, such as increased fatigue life, hardness, corrosion resistance and tribological properties [13], which is also confirmed by international studies. [3–10].

Mechanism and technological parameters. The essence of the technology is to bombard the surface of the part with a stream of hardened steel microballs DSK-0.3. The treatment is carried out on special shot-blasting installations of the injection type that ensure a uniform supply of balls. This method is widely used to strengthen critical parts of mechanical engineering, in particular in railcar construction [14].

Key processes and consequences. The main condition for nanostructuring is cold plastic deformation, i.e. deformation without signs of recrystallization, which is what characterizes the process of microsphere impact. It leads to grain crushing of the crystal structure in the surface layer. As a result, hardening occurs due to work hardening, as well as the formation of compressive residual stresses in the surface layer. The latter are a key factor for significantly increasing the fatigue strength of machined parts.

Methodology for determining a reinforced (nanostructured) layer.

To analyze this process, the classical solution of the theory of elasticity for a half-space loaded with a concentrated force was applied [15]. The corresponding calculation model is shown in Fig. 1. Let the plane $z = 0$ be a face of a semi-infinite solid, let this plane be acted upon by a concentrated force P along the z axis (Fig. 1). In the literature, this problem is called the Boussinesq problem.

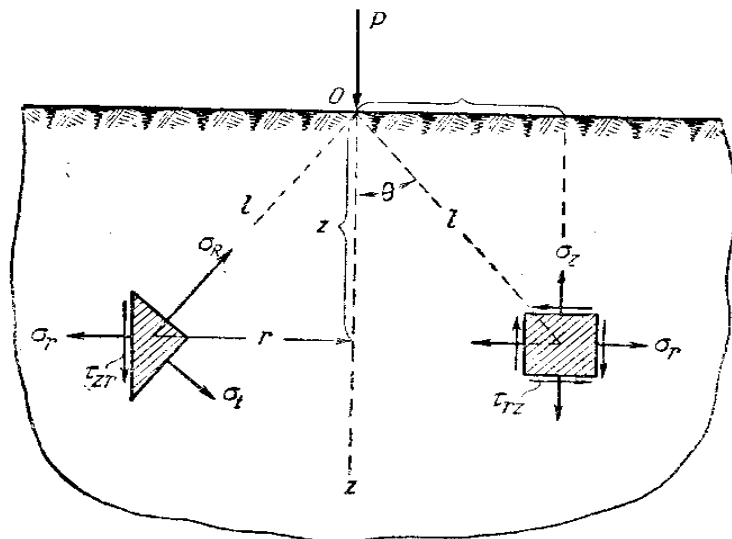


Fig. 1 Concentrated load on the boundary of an elastic half-space

The action of a concentrated force on the boundary of a semi-infinite array (Boussinesq problem) For radial stress, we can take as a first attempt the formula [15]:

$$\sigma_R = -kP \frac{\cos \theta}{l^2}, \quad (1)$$

where,

$k = -\frac{3P}{2\pi}$ Coefficient found from the condition of equilibrium of the cross-section $z = a$. Arises when integrating stresses;

P – value of concentrated force (tensile – positive, compressive – negative; in the formula, the sign ‘-’ corresponds to compression);

$l = R = \sqrt{r^2 + z^2}$ – distance from the point of application of force to any point of the elastic body;

θ – angle between the radius vector and the vertical axis z ($0 \leq \theta \leq \pi/2$ within the half-space).

Going to cylindrical coordinates, using the transition formulas we should obtain. Normal stress along the z -axis σ_z . Main factor in strength calculations. Tangential stress τ_{rz} .

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \sigma_R \cos^2 \theta \\ \tau_{rz} &= \frac{1}{2} \sigma_R \sin 2\theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Replacing $\cos \theta = \frac{z}{l}$, $\sin \theta = \frac{r}{l}$, $\frac{1}{2} \sin 2\theta = \frac{rz}{l^2}$ и $l^2 = z^2 + r^2$, we have:

r – radial coordinate m Distance from the z -axis (point of force application) to a point in the plane perpendicular to the load.

z – vertical coordinate m Depth from the surface (bottom surface) into the material.

$$\sigma_z = -kP \frac{z^3}{l^5}, \quad (3)$$

$$\tau_{rz} = -kP \frac{z^2 r}{l^2}. \quad (4)$$

To determine the coefficient k , we will compose the equilibrium equation for some horizontal section $z=a$. For an elementary platform in the form of an infinitely thin ring with width dr and radius r , we have the elementary internal force

$$\sigma_z dF = 2\pi \sigma_z r dr. \quad (5)$$

From all such elementary areas, i.e. from the entire cross section $z = a$, we have the sum of the internal forces

$$2\pi \int_0^\infty \sigma_z r dr = -2\pi k P z^3 \int_0^\infty \frac{r dr}{l^5}. \quad (6)$$

Because $l^2 = (z^2 + r^2)$, then, differentiating, we have $2l dl = 2r dr$. Thus, (6) is rewritten as:

$$-2\pi k P r^3 \int \frac{dl}{l^4} = -\frac{2}{3} \pi k P. \quad (7)$$

The equilibrium equation along the section $z = a$ (sum of projections onto the z axis) leads to the expression

$$-\frac{2}{3} \pi k P + P = 0, \quad (8)$$

where $k = \frac{3}{2\pi}$.

The fact that expressions (4) and (5) give an exact solution to the problem can be proven by using the stress function. Performing this operation will also allow us to determine other stress components (σ_θ, σ_r). Based on the above

$$\varphi = C_1 z \ln r + C_2 (r^2 + z^2)^{\frac{1}{2}} + C_3 z \ln \left(\frac{\sqrt{r^2 + z^2} - z}{\sqrt{r^2 + z^2} + z} \right). \quad (9)$$

Finally, the formulas for voltages will take the form:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= -\frac{3}{2} \cdot \frac{P}{\pi} \cdot \frac{z^2}{l^5} \\ \sigma_r &= -\frac{P}{2\pi} \left[\frac{1-2\mu}{l(l+z)} - \frac{3zr^2}{l^5} \right] \\ \sigma_\theta &= \frac{P}{2\pi} (1-2\mu) \left[\frac{z}{l^3} - \frac{1}{l(l+z)} \right] \\ \tau_{rz} &= -\frac{3P}{2\pi} \cdot \frac{z^2 r}{l^5} \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

μ – Poisson’s ratio

To determine the displacements, we use equation (2). The component of the displacement along the radius r

$$u = \varepsilon_r r = \frac{r}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_\theta)]. \quad (11)$$

E – Young’s modulus Pa

After substituting (11) into expressions (10) and transformations, we obtain

$$u = \frac{P}{4\pi G} \left[\frac{rz}{l^3} - (1-2\mu) \frac{r}{l^2 + lz} \right]. \quad (12)$$

When $l = \infty$, as expected, $u = 0$. Based on this

$$\frac{\partial w}{\partial z} = \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_\theta)], \quad (13)$$

where

$$w = \frac{1}{E} \int [\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_\theta)] dz + f(r). \quad (14)$$

After substituting (14) into expressions (12) and integrating, also assuming that $w_{r=\infty} = 0$, we get:

$$f(r) = 0 \text{ и } w = \frac{P}{4\pi G} \left[\frac{2(1-\mu)}{l} + \frac{z^2}{l^3} \right]. \quad (15)$$

For vertical displacements of points on the boundary plane $z = 0$ for the so-called “day surface” we obtain the expression:

$$w_{z=0} = \frac{P(1-\mu^2)}{\pi E r}. \quad (16)$$

At the origin, as was the case in the plane problem, the displacements and stresses become infinitely large, and therefore it is necessary to imagine that at the origin in

the region of plastic deformations the material is cut out by a hemispherical surface of small radius, and the concentrated force P is replaced by statically equivalent forces distributed over this surface.

Mises' plasticity criterion. Condition for the material to transition to a plastic state:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_t)^2 + (\sigma_z - \sigma_t)^2} = \sigma_T, \quad (17)$$

where is the yield strength of the part material. σ_T -tangential (circumferential) stress Pa

Stressed state under the condition of incompressibility ($\mu = 0.5$)

From equations (10) we obtain:

$$\sigma_z = -\frac{3}{2} \frac{P}{\pi l^2}, \quad \sigma_r = 0, \quad \sigma_t = 0. \quad (18)$$

Simplified plasticity criterion

After substituting the stresses in (3):

$$\frac{3}{2} \frac{P}{\pi l^2} = \sigma_T. \quad (19)$$

Thickness of nanostructured layer (basic formula)

From (19) the layer thickness is expressed as the width of the contact zone: δl

$$\delta = l = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P}{\pi \sigma_T}}. \quad (20)$$

The impact force of one pellet

$$P = p_0 \pi R^2 \sin \alpha, \quad (21)$$

where is the pressure in the air jet with the shot, p_0

R – radius of the grain;

α – the angle between the jet and the surface of the part.

Final calculation formula for layer thickness

After substitution into formula (20): P

$$\delta = R \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_0 \sin \alpha}{\sigma_T}}, \quad (22)$$

where: δ – thickness of the nanostructured surface layer,

R – radius of the grain,

p_0 – pressure in the jet,

α – angle of incidence of the jet,

σ_T – yield strength of the material of the workpiece.

Based on calculations according to formula (22), the following table of calculated values of the thickness of the nanostructured layer (δ) can be compiled depending on the yield strength of the material (σ_T) and the pressure in the jet (p_0).

Initial data for calculation:

Particle radius, $R = 10^{-4}$ m (0.1 mm)

Angle of incidence of the jet, $\alpha = 30^\circ$

$\sin(30^\circ) = 0.5$

Table 1

Dependence of the thickness of the nanostructured layer (δ , μm) on the yield strength (σ_r , MPa) and the pressure in the jet (p_0 , MPa)

σ_r , MPa	$p_0 = 0.1$ MPa	$p_0 = 0.2$ MPa	$p_0 = 0.3$ MPa	$p_0 = 0.4$ MPa	$p_0 = 0.5$ MPa
200	~12.9	~18.3	~22.4	~25.8	~28.9
400	~9.1	~12.9	~15.8	~18.3	~20.4
600	~7.5	~10.5	~12.9	~14.9	~16.7
800	~6.5	~9.1	~11.2	~12.9	~14.5
1000	~5.8	~8.2	~10.0	~11.5	~12.9
1200	~5.3	~7.5	~9.1	~10.5	~11.8
1400	~4.9	~6.9	~8.5	~9.8	~10.9
1600	~4.6	~6.5	~7.9	~9.1	~10.2

Figure 2: Dependence of the thickness of the nanostructured layer of the processed material on the yield strength based on the calculations in Table 1

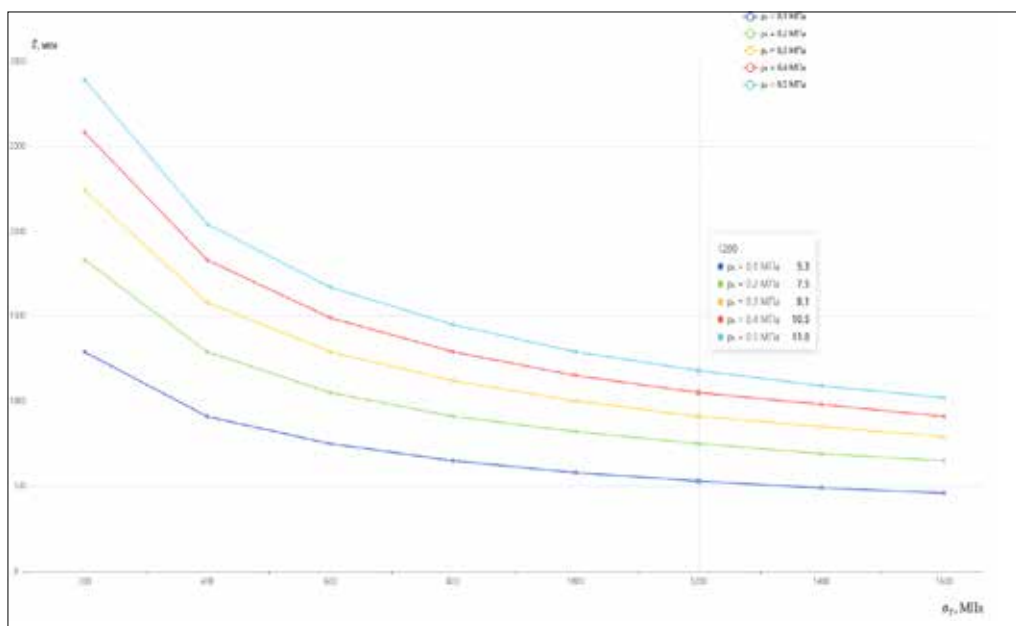


Fig. 2. Dependence of the thickness of the nanostructured layer of the processed material on the yield point:

1 – $p_0 = 0.1$ MPa; 2 – $p_0 = 0.2$ MPa; 3 $p_0 = 0.3$ MPa, 4 $p_0 = 0.4$ MPa, 5 – $p_0 = 0.5$ MPa

Conclusions.

Based on the solution of the contact problem of the theory of elasticity about the action of force on an elastic half-space, formulas are proposed for calculating the technological parameters of shot blasting of mechanical engineering parts, in particular for the formation of a nanostructured layer on the surface of the part.

During cold plastic deformation, which is implemented in the process of shot peening, the grains of the crystal structure of the surface of the processed metal are ground

to nanosize, which contributes to increasing fatigue life, hardness, corrosion resistance, and improving tribotechnical characteristics.

The presence of a nanostructured layer on the surface provides improved long-term and fatigue strength characteristics, since from the standpoint of fracture mechanics, it is the surface that determines the risk of crack formation and growth, leading to the destruction of mechanical engineering parts.

Based on the analytical solution of the contact problem of the theory of elasticity for a half-space, calculation dependencies have been developed that allow for reasonable control of the main technological parameter of shot blasting – pressure (p_0) – to achieve a given thickness of the nanostructured layer (h) on the surface of the part, taking into account the mechanical properties of the material (yield strength, σ_t).

It has been established that cold plastic deformation during shot peening leads to effective grinding of crystallites of the surface layer of the metal to a nano-sized state. The formation of such a nanostructure is a key factor for a comprehensive increase in operational properties: fatigue life, hardness, corrosion resistance and wear resistance.

It is scientifically proven that the created nanostructured layer significantly improves the durability and fatigue strength of the part. This is due to the fact that the modified surface, from the point of view of fracture mechanics, becomes an effective barrier to the initiation and propagation of cracks, which is the main failure mechanism of many mechanical engineering components.

Scientific and practical conclusions

It has been established that shot blasting is an effective tool for creating gradient nanostructures on the surface of metals. The process of microstructural evolution goes through the stages of dislocation wall formation, fragmentation, and final nanostructuring. Grain grinding to sizes of 40–80 nm was achieved in the surface layer of the studied samples. It has been proven that the formation of a gradient layer provides a smooth distribution of microhardness, which prevents delamination of the hardened zone. It was determined that the optimal angle of attack of the shot for maximum nanostructuring is 75–90 degrees. An increase in the endurance limit of machined parts by 30–45 % compared to the initial state was established. The effect of stabilizing residual compressive stresses at a depth of up to 0.5 mm was revealed. Nanostructuring of the surface leads to a reduction in the friction coefficient by 15–20 %. It has been found that gradient structures retain their stability when heated to 300°C. The mathematical model allows predicting the depth of the nanostructured layer with an accuracy of up to 90 %. Practical tests have confirmed the feasibility of using shot blasting nanostructuring for shafts and gears. Recommendations have been developed for the selection of shot material to minimize surface contamination.

The results of the study are the basis for creating new standards for finishing high-strength parts. Thus, the proposed model provides an engineering tool for the predictive formation of a nanostructured layer by shot peening. This technology is an effective method of surface strengthening and anti-corrosion treatment of the surface of load-bearing systems of cars and locomotives, aimed at increasing the service life and reliability of machine parts by purposefully creating a barrier layer with an ordered nanostructure.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тулупов В., Онищук С. Дослідження технологій поверхневого зміцнення деталей машин. *Технічні науки та технології*. 2021. № 3 (25). С. 55–60. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-3\(25\)-55-60](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-3(25)-55-60)
2. Фомін О. В. Аналіз та класифікація пошкоджень універсальних напіввагонів, які виникають за час їх життєвого циклу [Текст] / О. В. Фомін, О. В. Бурлуцький. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2012. № 4. С. 163–167. <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1293/1291>
3. Liu H., Zhang X., Wei X., Gan J., Jiang C. The effect of warm shot peening on microstructure evolution and residual stress in gradient nanostructured Mg-8Gd-3Y-0.4Zr alloys. *Coatings*. 2025. Vol. 15, No. 3. P. 316. <https://doi.org/10.3390/coatings15030316>
4. Zhao X., Gu K., Zhang M., Weng Z., Pan R., Liu B., Wang J. Evolution of surface gradient hardening layer of AISI 304 stainless steel induced by cryogenic conventional shot peening. *Materials Science and Engineering: A*. 2025. Vol. 925. Art. 147919. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.147919>
5. Wei Y., Seetharaman S., Lee J. J., Zhao Y., Chua A., Liu H. F., Cheng B., Tan C. C. Engineered surface nanocrystalline structures in SS304 via severe shot peening: Insights into microstructural evolution and mechanical property modulation. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. Vol. 37. P. 2281–2289. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.06.172>
6. Pei X. et al. The Influence of Laser Shock Peening on the Microstructure and Mechanical Properties of AH32 Stee. *Materials Science and Engineering A*. 2025. Vol. 944. Art. 148905. <https://doi.org/10.3390/ma18204679>
7. Sun H. Effect of ultrasonic shot peening on the microstructure evolution of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2024. <https://doi.org/10.1177/02670844241298674>
8. Neslušán M. et al. Shot peening of stainless steels and their monitoring via Barkhausen noise emission. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.07.251>
9. Bai B., Wongeun Y., Sungyu K., Joonho M., Eunsub Y., Songkil K., Chi B., Effects of different peening techniques on residual stress and microstructure in nickel-base alloy 600 and 690. *Nuclear Engineering and Technology*. 2026. <https://doi.org/10.1016/j.net.2025.103955>
10. Hu, H., Wang, Z., Guo, Z., Wu, Y., Zheng, H. Finite element analysis and experimental investigation of residual stress in WE43 magnesium alloy by Nd:YAG laser shock peening. *Journal of Alloys and Compounds*. 2025. Vol. 1038. Art. 182791. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.182791>
11. Maleki, E., Bagherifard, S., Heydari Astarace, A., Sgarbazzini, S., Bandini, M., Guagliano, M. Application of gradient severe shot peening as a novel mechanical surface treatment on fatigue behavior of additively manufactured AlSi10Mg. *Materials Science and Engineering: A*. 2023. Vol. 881. Art. 145397. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145397>

12. Yang, J., Liu, D., Li, M., Ren, Z., Liu, D., Xu, X., Zhang, X., Zhang, H., Xiang, J., Ye, C. Evolution mechanism for a surface gradient nanostructure in GH4169 superalloy induced by an ultrasonic surface rolling process. *Materials Science and Engineering: A*. 2023. Vol. 879. Art. 145271. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145271>
13. Пат. WO 2012089989 A1. Surface treatment of a metal part by oblique shot peening : публ. 07.05.2012, МПК C21D 7/04, C21D 10/00 / заявл. та патентівл. MTU Aero Engines AG; винахідн. Markus Opheys [та ін.]. URL: <https://patents.google.com/patent/WO2012089989A1/en>
14. Fomin O. V., Burlutskiy O. V., Khara M. V., Melnyk O. M., Prochorchuk M. V., Muraviov V. M. Optimisation of the technological process of shot blasting before the restoration of non-weight-bearing structures of freight cars. *Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University*. 2025. No. 3 (501). P. 106–112. [https://doi.org/10.15589/znp2025.3\(501\).11](https://doi.org/10.15589/znp2025.3(501).11)
15. Горбачовський Й. І., Мартинюк П. М. Основи механіки суцільного середовища: Пружність, пластичність, повзучість : навч. посіб. Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2010. 400 с.

REFERENCES

1. Tulupov, V., & Onyshchuk, S. (2021). Doslidzhennia tekhnolohii poverkhnevoho zmitsnennia detaliv mashyn [Research of technologies of surface hardening of machine parts]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, 3 (25), 55–60. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-3\(25\)-55-60](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-3(25)-55-60)
2. Fomin, O. V., & Burlutskiy, O. V. (2012). Analiz ta klasyfikatsiia poshkodzen universalnykh napivvahoniv, yaki vynykaiut za chas yikh zhyttievoho tsykladu [Analysis and classification of damages of universal semi-wagons that occur during their life cycle]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, (4), 163–167. Retrieved from <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1293/1291>
3. Liu, H., Zhang, X., Wei, X., Gan, J., & Jiang, C. (2025). The effect of warm shot peening on microstructure evolution and residual stress in gradient nanostructured Mg-8Gd-3Y-0.4Zr alloys. *Coatings*, 15 (3), 316. <https://doi.org/10.3390/coatings15030316>
4. Zhao, X., Gu, K., Zhang, M., Weng, Z., Pan, R., Liu, B., & Wang, J. (2025). Evolution of surface gradient hardening layer of AISI 304 stainless steel induced by cryogenic conventional shot peening. *Materials Science and Engineering: A*, 925, 147919. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.147919>
5. Y. Wei, S. Seetharaman, J. Jun Lee c, Y. Zhao, A. Chua, H. Fei Liu, B. Cheng, C. Cheh Tan. (2025). Engineered surface nanocrystalline structures in SS304 via severe shot peening: Insights into microstructural evolution and mechanical property modulation. *Journal of Materials Research and Technology*, 37, 2281–2289. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.06.172>
6. Pei, X. (2025). The influence of laser shock peening on gradient microstructural evolution and mechanical property enhancement in IN718 superalloy. *Materials Science and Engineering: A*, 944, 148905. <https://doi.org/10.3390/ma18204679>

7. Sun, H. (2024). Effect of ultrasonic shot peening on the microstructure evolution of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*. <https://doi.org/10.1177/02670844241298674>
8. Neslušán, M. et al (2025). Shot peening of stainless steels and their monitoring via Barkhausen noise emission. *Journal of Materials Research and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.07.251>
9. Bai B., Wongeun Y., Sungyu K., Joonho M., Eunsub Y., Songkil K., Chi B., (2026). Effects of different peening techniques on residual stress and microstructure in nickel-base alloy 600 and 690. *Nuclear Engineering and Technology*. Volume 58. <https://doi.org/10.1016/j.net.2025.103955>
10. Hu, H., Wang, Z., Guo, Z., Wu, Y., Zheng, H. (2025) Finite element analysis and experimental investigation of residual stress in WE43 magnesium alloy by Nd:YAG laser shock peening. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 1038. Art. 182791. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.182791>
11. Maleki, E., Bagherifard, S., Heydari Astarace, A., Sgarbazzini, S., Bandini, M., Guagliano, M. (2023) Application of gradient severe shot peening as a novel mechanical surface treatment on fatigue behavior of additively manufactured AlSi10Mg. *Materials Science and Engineering: A*. 2023. Vol. 881. Art. 145397. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145397>
12. Yang, J., Liu, D., Li, M., Ren, Z., Liu, D., Xu, X., Zhang, X., Zhang, H., Xiang, J., Ye, C. (2023) Evolution mechanism for a surface gradient nanostructure in GH4169 superalloy induced by an ultrasonic surface rolling process. *Materials Science and Engineering: A*. Vol. 879. Art. 145271. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145271>
13. MTU Aero Engines AG (Inventor: Opheys, M., et al.). (2012, May 7). Surface treatment of a metal part by oblique shot peening (WO Patent No. WO 2012089989 A1). World Intellectual Property Organization. <https://patents.google.com/patent/WO2012089989A1/en>
14. Fomin, O. V., Burlutskyi, O. V., Khara, M. V., Melnyk, O. M., Prochorchuk, M. V., & Muraviov, V. M. (2025). Optimizatsiia tekhnolohichnoho protestu drobostruminnoho ochyshchennia pered vidnovlenniam nevahnomykh konstruktsii vahoniv [Optimisation of the technological process of shot blasting before the restoration of non-weight-bearing structures of freight cars]. *Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University*, (3), 106–112. [https://doi.org/10.15589/znp2025.3\(501\).11](https://doi.org/10.15589/znp2025.3(501).11)
15. Horbachovskyi, Y. I., & Martyniuk, P. M. (2010). *Osnovy mekhaniky sutsilnoho seredovyshcha: Pruzhnist, plastychnist, povzuchist* [Basics of continuum mechanics: Elasticity, plasticity, creep]. Lviv Polytechnic Publishing House.

Дата першого надходження статті до видання: 26.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

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 напівавтомного 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 tekhnolohii 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

АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ СИЛ ІНЕРЦІЇ
КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНІЗМУ
МАЛООБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ

В.П. Савчук¹, Є.В. Білоусов², Ю.М. Кучеренко³, Д.В. Курносенко⁴

¹к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок,
Херсонська державна морська академія, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-5266-850X

²д.т.н., професор кафедри суднових енергетичних систем та комплексів,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0001-8185-8209

³к.т.н., доцент кафедри суднових енергетичних систем та комплексів
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID: 0000-0002-1568-165X

⁴старший викладач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок,
Херсонська державна морська академія, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0003-3417-8766

Анотація

Вступ. Впровадження концепцій Індустрії 4.0 та технологій цифрових двійників (Digital Twins) у суднову енергетику вимагає переходу від класичних спрощених моделей динаміки до прецизійних алгоритмів, здатних працювати в режимі реального часу. Забезпечення безвідмовності сучасних малообертових дизелів (МОД) залежить від точного визначення інерційних навантажень, які визначають ресурс підшипників та вібраційну активність двигуна. **Мета:** розробка та обґрунтування прецизійного алгоритму розрахунку динамічних навантажень у КШМ малообертових двигунів шляхом порівняльного аналізу багатомасових моделей та уточнення кінематичних залежностей для їх подальшої інтеграції в цифрові двійники суднових енергетичних установок. **Результати.** У роботі виконано порівняльний аналіз точності розрахунку сил інерції та реакцій у підшипниках КШМ із використанням класичної двомасової моделі, вдосконаленої двомасової моделі з коригувальним моментом та тримасової моделі. Для підвищення точності аналітичних розрахунків запропоновано застосування уточненої формули визначення прискорення поршня, яка враховує вищі гармоніки та забезпечує приріст точності у пікових точках на 3...5 % при значеннях $\lambda \approx 0,5$. Дослідження проведено на прикладі двигуна MAN B&W 6S46ME-B8.5 із верифікацією масо-інерційних характеристик у середовищі SolidWorks. Встановлено, що класична двомасова модель має систематичну похибку визначення моменту інерції шатуна до 30 %, що викривлює значення бічних сил. Вдосконалена двомасова модель, хоч і забезпечує точність середніх значень, генерує нефізичні сплески навантажень через різкі зміни кутового прискорення, що є критичним для систем діагностики. Тримасова модель продемонструвала найкращі результати: похибка відносно еталонних значень не перевищує 1...2 %, а графіки сил



залишаються фізично коректними. **Висновки.** Доведено, що тримасова модель є оптимальною для використання в ядрі цифрових двійників МОД, оскільки поєднує точність методів скінченних елементів (FEM) із високою обчислювальною швидкістю зосереджених параметричних моделей.

Ключові слова: малообертовий дизель, кривошипно-шатунний механізм, сили інерції, цифровий двійник, тримасова модель, динаміка двигуна.

ANALYSIS OF THE ACCURACY OF METHODS FOR CALCULATING THE INERTIA FORCES OF THE CRANK-CONNECTING ROD MECHANISM OF LOW-SPEED DIESEL ENGINES

V.P. Savchuk¹, Ie.V. Bilousov², Yu. M. Kucherenko³, D.V. Kurnosenko⁴

¹ Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Vessel's Power Plants Operation,
Kherson State Maritime Academy, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-5266-850X

² Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department
of Vessel's Energy Systems and Complexes,
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0001-8185-8209

³ Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Vessel's Energy Systems and Complexes
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-1568-165X

³ Senior Lecturer of the Department of Vessel's Power Plants Operation,
Kherson State Maritime Academy, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-3417-8766

Summary

Introduction. The implementation of Industry 4.0 concepts and Digital Twin technologies in marine engineering necessitates a transition from classical simplified dynamic models to precision algorithms capable of real-time operation. The reliability of modern long-stroke low-speed engines (LSE) depends on the accurate determination of inertial loads, which define bearing life and engine vibration activity. **Purpose:** development and justification of a precision algorithm for calculating dynamic loads in the crank mechanism of low-speed engines through comparative analysis of multi-mass models and refinement of kinematic dependencies for their further integration into digital twins of ship power plants. **Results.** The paper presents a comparative analysis of the accuracy in calculating inertia forces and bearing reactions using the classical two-mass model, an improved two-mass model with a corrective moment, and a three-mass model. To enhance analytical precision, a refined formula for piston acceleration is proposed. It accounts for higher harmonics, improving accuracy at peak points by 3...5 % for crank-to-connecting rod ratios $\lambda \approx 0,5$. The study is based on the MAN B&W 6S46ME-B8.5 engine, with mass-inertia characteristics verified using SolidWorks. It was found that the classical two-mass model exhibits a systematic error in determining the connecting rod's moment of inertia of up to 30 %, distorting the side force values. While the improved two-mass model provides accurate average values, it generates non-physical load spikes due to rapid changes in angular acceleration, posing risks

for diagnostic systems. The three-mass model showed the best performance: the error relative to reference values does not exceed 1...2 %, and the force plots remain smooth and physically correct. **Conclusions.** The study proves that the three-mass model is optimal for the core of LSE Digital Twins, as it combines the accuracy of Finite Element Methods (FEM) with the computational efficiency of lumped parameter models.

Keywords: low-speed engine, crank-connecting rod mechanism, inertia forces, Digital Twin, three-mass model, engine dynamics.

Вступ. Сучасна морська індустрія переживає фундаментальну трансформацію, зумовлену переходом до концепцій Індустрії 4.0. Традиційні підходи до експлуатації суднових енергетичних установок, що базувалися на планово-попереджувальних ремонтах та періодичному обслуговуванні, поступово поступаються місцем стратегіям обслуговування за фактичним станом (Condition-Based Maintenance – CBM) із застосуванням методів прогнозування залишкового ресурсу (Predictive Maintenance – PdM) [1; 2]. У цьому контексті забезпечення безвідмовності мало-оберткових дизелів (МОД), які є основним типом пропульсивних установок для великотоннажного флоту, стає критичною інженерною задачею. Кривошипно-шатунний механізм (КШМ) є кінематичним серцем двигуна внутрішнього згоряння, трансформуючи енергію розширення газів у обертальний рух колінчастого валу. Водночас, КШМ є джерелом значних динамічних навантажень. Зворотно-поступальний рух масивних деталей – поршня, штока, крейцкопфа – генерує інерційні сили, які циклічно змінюють свій напрямок і величину. Ці сили, накладаючись на сили тиску газів, формують складний спектр навантажень на підшипникові вузли, викликають вібрації корпусу двигуна та судна в цілому, а також визначають втомну міцність деталей. Актуальність точного розрахунку цих сил зростає пропорційно до форсування двигунів. Сучасні довгохідні (long-stroke) та наддовгохідні (super-long-stroke) дизелі характеризуються високими значеннями середнього ефективного тиску та збільшеними масами рухомих деталей для забезпечення необхідного ходу поршня. У таких умовах навіть незначні похибки в математичних моделях, що використовуються для розрахунку динаміки, можуть призвести до критичних помилок у проектуванні підшипників або налаштуванні систем моніторингу [2–4].

Історично склалося так, що інженерна школа динаміки двигунів спиралася на спрощені аналітичні моделі. Професор А. Радціг у своїй фундаментальній праці 1933 року [5] систематизував методи приведення мас, запропонувавши двомасову модель заміщення шатуна як стандарт для інженерних розрахунків. Ця модель, де маса шатуна умовно розділяється на дві зосереджені маси (обертальну та зворотно-поступальну), дозволила значно спростити ручні розрахунки в докомп'ютерну еру. Моніторинг технічного стану підшипникових вузлів КШМ в реальному часі потребує найбільш повної інформації про робочі процеси. Датчики можуть надати інформацію про наслідки (вібрацію, температуру), але для розуміння причин (сил, що діють у змащувальному шарі) необхідна адекватна математична модель, яка працює в ядрі діагностичної системи. Класична двомасова модель фізично не здатна одночасно задовольнити умови збереження маси, положення центру мас та моменту інерції шатуна, що здійснює складний плоскопаралельний рух [6; 7]. Це призводить до систематичної похибки у визначенні моменту інерції шатуна,

що викривлює розрахункові значення бічних сил та реакцій у підшипниках. Для сучасних систем цифрових двійників, які прагнуть досягти точності прогнозування зносів та відмов, такі спрощення стають «слабкою ланкою».

Концепція цифрового двійника (Digital Twin – DT) передбачає створення віртуальної репліки фізичного активу, яка постійно оновлюється даними з реального об'єкта. У судновій енергетиці DT використовуються для оптимізації ефективності та технічного обслуговування із застосуванням методів прогнозування залишкового ресурсу. Ефективність цифрового двійника залежить від балансу між точністю моделі та швидкістю обчислень. Високоточні моделі (High-Fidelity) базуються на методі скінченних елементів (МСЕ/FEM) [8] або обчислювальній гідродинаміці (CFD). Вони забезпечують виняткову деталізацію напружень та деформацій, але вимагають значних обчислювальних потужностей і часу, що унеможливує їх використання в режимі online на бортовому обладнанні. Моделі на основі даних (Data-Driven): Використовують машинне навчання (ML) для пошуку кореляцій. Вони швидкі, але залежать від якості навчальних вибірок і часто не враховують фізичні обмеження системи. Зосереджені параметричні моделі (Lumped Parameter Models) займають проміжне положення. Вони базуються на фізичних рівняннях (Physics-Based), але використовують спрощення (зосереджені маси) для прискорення розрахунків. Саме в контексті зосереджених параметричних моделей для DT постає питання актуалізації методів розрахунку сил інерції.

Основна частина. Двомасова модель – це фундаментальна динамічна схема заміщення, що дозволяє звести складний плоскопаралельний рух шатуна до руху двох точкових мас, який можна розкласти на поступальний рух разом з його центром мас (ЦМ) і обертальний рух навколо осі, що проходить через ЦМ. Це означає, що шатун має три ступені свободи:

- лінійні координати ЦМ ($x_{цм}, y_{цм}$);
- кут повороту шатуна β навколо поршневого пальця (поперечини крейцкопфа для МОД)

Щоб система двох мас повністю відповідала реальному шатуну, повинні виконуватися три умови:

1. Збереження загальної маси:

$$m_1 + m_2 = m_{ш}, \quad (1)$$

- де m_1 – приведена маса в поршневій головці;
 m_2 – приведена маса в кривошипній головці;
 $m_{ш}$ – маса шатуна в зборі.

2. Збереження положення центру мас:

$$m_1 \cdot L_n = m_2 \cdot L_k, \quad (2)$$

- де L_n – відстань від ЦМ до осі поршневої головки (крейцкопфа);
 L_k – відстань від ЦМ до осі кривошипної головки;
 $L = L_n + L_k$ – довжина шатуна.

3. Збереження моменту інерції:

$$I_{ш}^{ц.м.} = m_1 \cdot L_n^2 + m_2 \cdot L_k^2, \quad (3)$$

- де $I_{ш}^{ц.м.}$ – момент інерції шатуна відносно його власного центру мас.

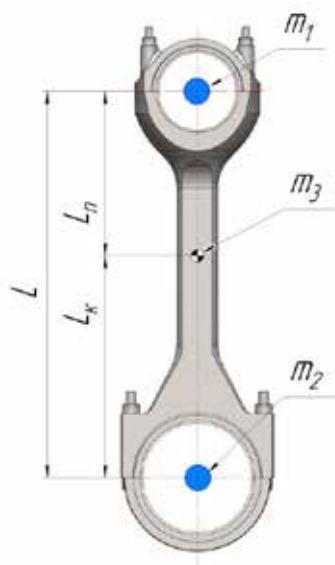


Рис. 1. Схема визначення положення мас та довжин шатуна

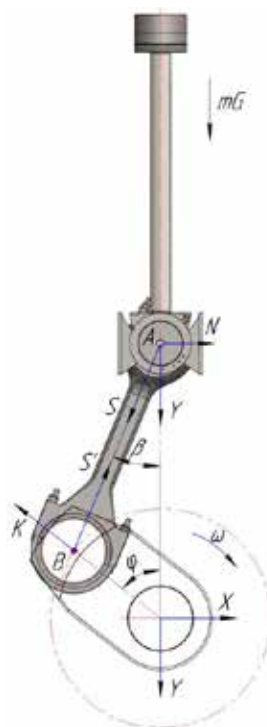


Рис. 2. Схема сил, що діють в КШМ МОД

Система з наведених вище трьох рівнянь з двома невідомими ($m_{ш.п.}$ і $m_{ш.к.}$) не має точного розв'язку. З (1) і (2) отримуємо:

$$m_1 = m_{ш.} \cdot \frac{L_k}{L}, \quad m_2 = m_{ш.} \cdot \frac{L_n}{L}. \quad (4)$$

Підставляючи отримані умови в (3):

$$m_{ш.} \cdot \frac{L_k}{L} \cdot L_n^2 + m_{ш.} \cdot \frac{L_k}{L} \cdot L_k^2 = m_{ш.} \cdot L_n \cdot L_k, \quad (5)$$

$$I_{мод} = m_{ш.} \cdot L_n \cdot L_k.$$

Отримана залежність не описує реальний момент інерції:

$$I'_{ш} = m_{ш.} \cdot L_n \cdot L_k \neq m_{ш.} \cdot \rho^2 = I_{ш.}^{н.м.} \quad (6)$$

де ρ – радіус інерції шатуна.

Розбіжність моментів інерції означає, що двомасова модель не може точно відтворити обертальну інерцію шатуна. Для типового шатуна чотиритактного дизеля $L_n \cdot L_k > \rho^2$ (зазвичай на 10...30 %). Це означає, що система заміщення мас великий момент інерції – вона «більш інерційна» при кутових прискореннях, ніж реальний шатун.

На практиці застосовують кілька методів для коригування двомасової моделі. Одним із них є метод пріоритету лінійної динаміки, в основу якого покладено ідею домінування в КШМ лінійних сил інерції, які визначають навантаження на

підшипники та основні напруження. Кутова інерція має другорядне значення. В розрахунках використовують співвідношення мас для МОД, яке в різних літературних джерелах має суттєві відмінності. Інший метод мінімізації похибки пропонує вибирати таке розташування точок заміщення, щоб мінімізувати сумарну похибку. З цією метою здійснюють пошук положення мас m_1 і m_2 у точках на відстанях l_1 і l_2 від ЦМ, що задовольняють умови (1-3):

В розрахунках приймають $l_1=L_n$, $l_2=L_k$, але коректують співвідношення:

$$m_1 = m_{ш} \cdot \frac{L_k}{L_n} k, \quad m_2 = m_{ш} \cdot Lk, \quad (7)$$

де k – поправочний коефіцієнт (0,9...1,1).

Найбільш дієвим з точки зору зручності застосування та точності отриманих результатів є метод коригувального моменту, що нами використовується для оцінки точності розрахунків двомасової моделі. Він поєднує в собі геометричну зручність першого методу та фізичну точність другого. Даний метод усуває похибку в розрахунках моменту інерції шатуна, що є важливим при розрахунку бічних сил, шляхом умовного прикладання до шатуна величини коригувального моменту T_c , який відповідно врівноважується парою сил реакції в його підшипниках.

$$T_c = (I_{ш}^{н.м.} - I_{мод}) \ddot{\beta}, \quad (8)$$

де $\ddot{\beta}$ – кутове прискорення шатуна.

Момент інерції шатуна та його вплив на кутове прискорення шатуна $\ddot{\beta}$ знаходять із геометричних співвідношень:

$$\begin{aligned} \beta &= \arcsin(\lambda \sin \alpha), \\ \dot{\beta} &= \omega \frac{\lambda \cos \alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}}, \\ \ddot{\beta} &= -\omega^2 \frac{\lambda \sin \alpha (1 - \lambda^2 \cos^2 \alpha)}{(1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha)^{3/2}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Момент сил інерції від обертання шатуна

$$T_{ин.ш} = -I_{ш}^{н.м.} \cdot \ddot{\beta}. \quad (10)$$

Відповідно, максимальне значення моменту сил інерції шатуна становить при $\alpha = 90^\circ$: $T_{ин.ш} \approx I_{ш}^{н.м.} \cdot \omega^2 \lambda$. Цей момент:

- не впливає на загальну динаміку КШМ;
- впливає на розподіл навантаження в шатунному підшипнику;
- є важливий для розрахунку шпильок шатуна [9, 10].

Сили інерції в моделі. Сила інерції мас, що рухаються поступально направлена протилежно напрямку їх прискорення

$$P_j = -m_n \cdot a, \quad (11)$$

де m_n – маса деталей, що рухаються поступально;

a – прискорення деталей, що рухаються поступально.

В класичній моделі традиційно застосовують наближену формулу для розрахунку прискорення поршня [6; 7]:

$$a \approx R\omega^2 (\cos \varphi \pm \lambda \cos 2\varphi), \quad (12)$$

тож сила інерції може бути визначено за виразом:

$$P_j = -mR\omega^2 (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi). \quad (13)$$

Дана формула розрахунку сил інерції припускає, що шатун є нескінченно довгим порівняно із кутом його відхилення, і відсікає всі гармоніки вище другої. В МОД значення λ є досить великим, що робить стандартне наближення a недостатньо точним. Так як рівняння переміщення поршня можна записати як:

$$y = R \left(\cos \varphi + \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi} \right), \quad (14)$$

то швидкість поршня що є першою похідною переміщення за часом можна записати у вигляді

$$\begin{aligned} v &= \frac{dy}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = -R\omega \sin \varphi - \frac{L \cdot \lambda^2 \sin \varphi \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi}} \cdot \omega = \\ &= -R\omega \left(\sin \varphi + \frac{\lambda \sin 2\varphi}{2\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi}} \right), \end{aligned} \quad (15)$$

де $d\varphi/dt = \omega$ та $R = L \cdot \lambda$.

При виведенні залежності прискорення використаємо правило диференціювання частки для взяття похідної від другого доданка швидкості. Після виконання математичних перетворень та групування членів отримуємо точний вираз:

$$a = -R\omega^2 \left(\cos \varphi + \frac{\lambda \cos 2\varphi + \lambda^3 \sin^4 \varphi}{(1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi)^{1.5}} \right). \quad (16)$$

Для уточнення розрахунку прискорення шатуна в МОД застосуємо більш розгорнуту форму, яка представляє цей вираз у вигляді суми похідних для кращої обчислювальної стабільності при високих значеннях λ :

$$a = -R\omega^2 \left(\cos \varphi + \frac{\lambda \cos 2\varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi}} + \frac{\lambda^3 \sin^2 2\varphi}{4(1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi)^{1.5}} \right). \quad (17)$$

Це дає можливість покращити точність розрахунку прискорень в пікових точках від 3 до 5 % при значеннях $\lambda \approx 0,5$. Уточнена залежність враховує вплив вищих гармонік, які з'являються через відхилення шатуна на великі кути.

Крім сил інерції від поступально рухомих частин, в КШМ діють відцентрові сили інерції (рис. 2).

$$K = -m_j R\omega^2, \quad (18)$$

де m_j – маса обертових частин КШМ.

Енергетичний аспект моделі. Для оцінювання ефективності застосування двомасової моделі доцільно виконати її енергетичний аналіз. Кінетична енергія

реального шатуна може бути описана залежністю для тіла, що здійснює плоско-паралельний рух:

$$T_{\text{ш}} = \frac{1}{2} m_{\text{ш}} v_{\text{ц.м.}}^2 + \frac{1}{2} I_{\text{ш}}^{\text{ц.м.}} \omega_{\text{ш}}^2, \quad (19)$$

де $v_{\text{ц.м.}}$ – швидкість центру мас шатуна;

$\omega_{\text{ш}} = \dot{\beta}$ – кутова швидкість шатуна.

Кінетична енергія двомасової моделі визначається як сума кінетичної енергії виділених мас:

$$T_{\text{ш}} = \frac{1}{2} m_{\text{ш.п.}} v_{\text{п}}^2 + \frac{1}{2} m_{\text{ш.к.}} v_{\text{к}}^2, \quad (20)$$

де $v_{\text{п}}$ – швидкість частини шатуна, приведена до поршневої головки (поступальна);

$v_{\text{к}}$ – швидкість частини шатуна, приведеної до кривошипної головки (обертальна)

При правильному виборі виділених мас шатуна кінетична енергія моделі становить

$$E_{\text{к.мод}} \approx \frac{1}{2} m_{\text{ш}} v_{\text{ц.м.}}^2. \quad (21)$$

В класичній моделі відсутній член $\frac{1}{2} I_{\text{ш}}^{\text{ц.м.}} \omega_{\text{ш}}^2$, що може становити від 5 до 15 % від загальної енергії.

Виконаємо аналіз точності застосування класичного методу розрахунку, що базується на двомасовій моделі в порівняно із тримасовою моделлю. Наявність значної кількості пакетів 3D проектування надає можливість за короткий термін встановити масові характеристики шатунів ДВЗ, зокрема положення центру мас та момент інерції відносно центру мас в площині обертання. З метою наочності виконаного дослідження візьмемо за основу характеристики КШМ малообертового дизеля виробництва фірми MAN B&W 6S46ME-B8.5, що має наступні основні характеристики [11]:

- номінальна ефективна потужність (режиму SMCR) $N_e = 6330$ кВт;
- номінальна частота обертання колінчастого валу $n_{\text{ном}} = 110$ с⁻¹;
- діаметр циліндра $D = 0,46$ м;
- хід поршня $S = 1,932$ мм.

Розробка твердотільних моделей рухомих деталей кривошипно-шатунного механізму двигуна 6S46ME-B8.5 здійснювалось за допомогою програмного комплексу SolidWorks [12]. Загальна вага рухомих деталей КШМ (без врахування ваги кривошипу та телескопічної труби) становить 2775 кг. Момент інерції шатуна відносно центру мас в площині його обертання становить $I_{zz} = 733139667,18$ кг·мм², та відстань від осі кривошипної головки до центру мас шатуна становить $L_k = 1137,62$ мм.

Тримасова модель розрахунку сил інерції. Головною ідеєю тримасової моделі є заміна шатуна трьома точковими масами, що розташовано так, щоб точно відтворити всі умови динамічної еквівалентності. Маси в таких моделях розташовуються в центрах поршневої головки m_1 , кривошипної m_2 та у центрі мас шатуна m_3 .

В розрахунках застосовують умови еквівалентності:

– збереження маси

$$m_1 + m_2 + m_3 = m_{\text{ш}}; \quad (22)$$

– збереження положення центру мас (відносно точки А)

$$m_2 \cdot L + m_3 \cdot L_{\text{п}} = m_{\text{ш}} \cdot L_{\text{п}}; \quad (23)$$

– збереження моменту інерції (відносно точки А)

$$m_2 \cdot L^2 + m_3 \cdot L_{\text{п}}^2 = I_A, \quad (24)$$

де I_A – момент інерції шатуна відносно точки А, що пов'язаний з моментом інерції відносно ЦМ за теоремою Гюйгенса: $I_A = I_{\text{ц.м.}} + m_{\text{ш}} \cdot L_{\text{п}}^2$

Відповідно, маси m_2 та m_3 можна виразити як

$$m_2 = \frac{I_A - m_{\text{ш}} L_{\text{п}}^2}{L^2 - L \cdot L_{\text{п}}}, \quad (25)$$

$$m_3 = m_{\text{ш}} - m_2 \frac{L}{L_{\text{п}}}. \quad (26)$$

При виконанні розрахунків із використанням тримасової моделі приймають рух кожної маси

– m_1 (т. А) рухається зворотно-поступально з прискоренням поршня;

– m_2 (т. В) рухається обертово з доцентровим прискоренням;

– m_3 (т. С – ЦМ) рухається складно – суперпозиція поступального та обертового рухів.

Розрахунок сил інерції та реакцій у підшипниках шатуна. Повна сила інерції шатуна

$$F_{\text{ін}}^{\text{ш}} = F_{\text{ін}}^1 + F_{\text{ін}}^2 + F_{\text{ін}}^3. \quad (27)$$

Після проведених підстановок та спрощень, отримуємо:

$$F_{\text{інер}}^{\text{ш}} = -m_{\text{ш}} \cdot a_C, \quad (28)$$

що відповідає реальній силі інерції шатуна. Прискорення центру мас шатуна знаходиться через кінематику:

$$a_C = \frac{L_K}{L} a_A + \frac{L_{\text{п}}}{L} a_B + \alpha + r_C + \omega \cdot (\omega + r_C), \quad (29)$$

Момент інерції моделі точно дорівнює реальному:

$$I_{\text{мод}} = r_2 \cdot F_{\text{інер}}^2 + r_3 \cdot F_{\text{інер}}^3. \quad (30)$$

Запишемо рівняння рівноваги шатуна:

– сума моментів відносно т. А

$$M_{\text{ін}}(\varphi) + F_{\text{yB}}(\varphi)L - W_{\text{ш}}L_{\text{п}} = 0; \quad (31)$$

– сума проекцій на вісь Y

$$F_{\text{yA}}(\varphi) + F_{\text{yB}}(\varphi) + F_{\text{yін.ш.}}(\varphi) - W_{\text{ш}} = 0; \quad (32)$$

– сума проекцій на вісь X

$$F_{\text{xA}}(\varphi) + F_{\text{xB}}(\varphi) + F_{\text{xін.ш.}}(\varphi) = 0. \quad (33)$$

В результаті розв'язку системи рівнянь отримуємо залежності для визначення складових сил реакції в підшипникових вузлах шатуна:

$$\begin{aligned}F_{yB}(\varphi) &= \frac{W_{ш} L_p - M_{ин}(\varphi)}{L}; \\F_{yA}(\varphi) &= W_{ш} - F_{y_{ин.ш.}}(\varphi) - F_{yB}(\varphi); \\F_{xA}(\varphi) &= -F_{ин,A}(\varphi); \\F_{xB}(\varphi) &= -F_{xA}(\varphi) - F_{x_{ин.ш.}}(\varphi).\end{aligned}\tag{34}$$

Тоді сумарні реакції визначають за формулами:

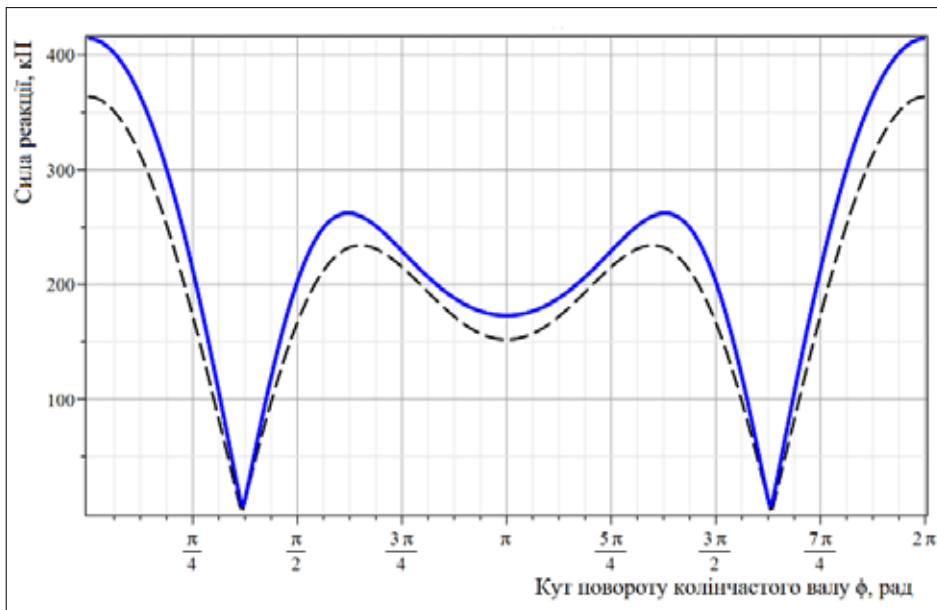
$$\begin{aligned}F_A(\varphi) &= \sqrt{F_{xA}^2(\varphi) + F_{yA}^2(\varphi)}; \\F_B(\varphi) &= \sqrt{F_{xB}^2(\varphi) + F_{yB}^2(\varphi)}.\end{aligned}\tag{35}$$

Користуючись наведеними міркуваннями, виконано розрахунок динамічних показників та визначено розподіл сумарних сил реакції в шатунному та крейцкопфному підшипниках на частоті обертання колінчастого валу 110 хв^{-1} при використанні різних моделей динамічного розрахунку КШМ. На рис. 3а і 3б наведено результати розрахунку сил реакції в досліджуваних підшипниках із застосуванням класичної двомасової моделі та вдосконаленої, із використанням коригуючого моменту та уточненого методу розрахунку сили інерції деталей, що рухаються поступально.

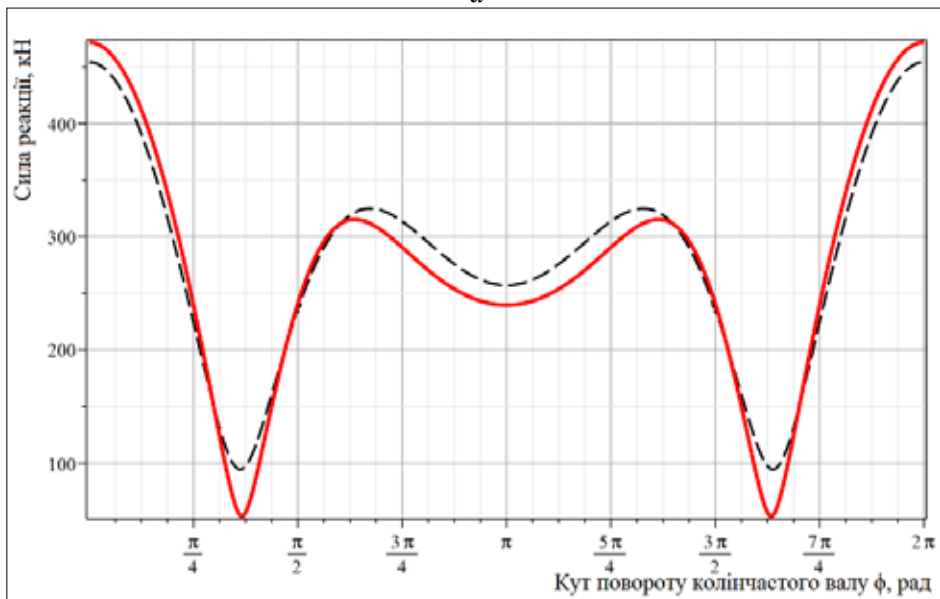
Класична модель демонструє завищений момент інерції (для досліджуваного шатуна похибка становить близько 10...30 %). Модель поводить ся так, ніби шатун «важче» розгойдати, ніж насправді. Це призводить до систематичної похибки у визначенні бічної сили N та реакцій у підшипниках. Графіки показують плавні криві, але вони зміщені відносно реальних значень, особливо в зонах ВМТ та максимального відхилення шатуна (близько 70...110 градусів повороту кривошипа).

Вдосконалення двомасової моделі є спробою виправити недолік базової моделі шляхом додавання «математичних милиць» – фіктивного зовнішнього моменту. При її застосуванні отримані сили інерції та реакції в підшипниках, що ідеально збігаються зі значеннями тримасової моделі (похибка < 1...2 %, що на рівні похибки округлення). Основним її недоліком є схильність генерувати «сплески» або різкі стрибки значень (рис. 5), оскільки коригувальний момент залежить від кутового прискорення, яке змінюється дуже різко.

При застосуванні тримасової моделі отримані графіки сил інерції та реакції в підшипниках гладкі, без розривів та сплесків. Модель точно описує динаміку як у ВМТ/НМТ, так і в моменти максимального бічного відхилення. На нашу думку застосування даного методу є єдиним варіантом, що придатний для цифрових двійників, оскільки він забезпечує точність рівня CAE (Computer-Aided Engineering) при швидкодії простих формул.

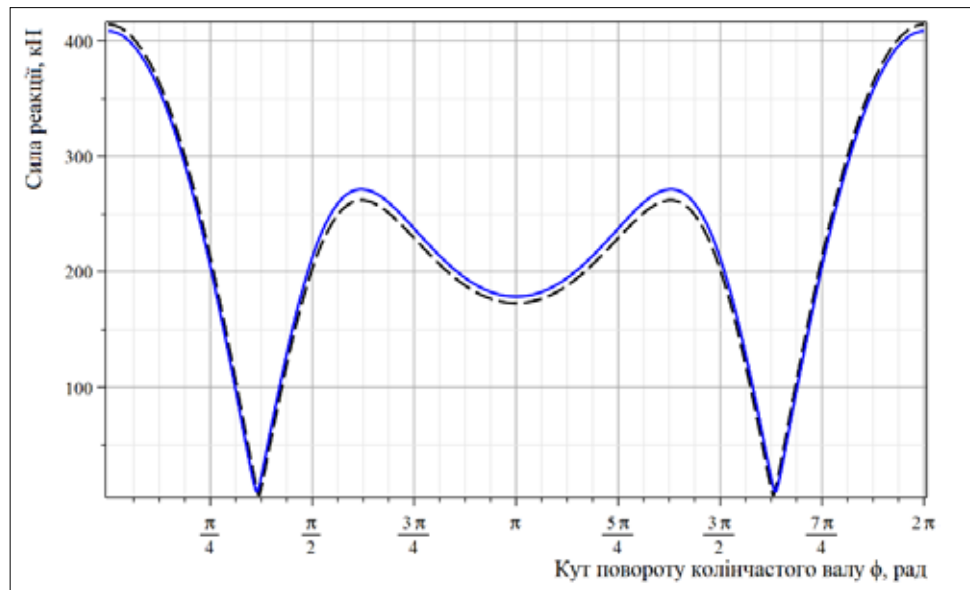


a

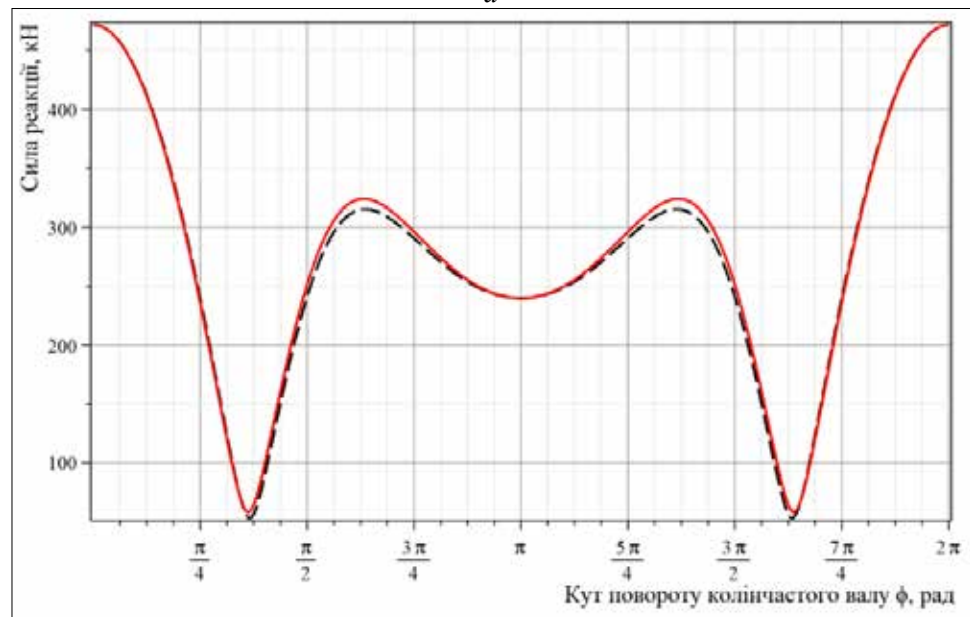


б

Рис. 3. Порівняння результатів розрахунку сили реакції на сили інерції в крعیкопфному (а) та шатунному підшипнику (б) при застосуванні двомасових моделей в класичному варіанті та вдосконаленому (суцільна лінія – двомасова вдосконала модель, пунктирна – класична двомасова модель)



а



б

Рис. 4. Порівняння результатів розрахунку сили реакції на сили інерції в кривокопфному (а) та шатунному підшипнику (б) при застосуванні вдосконаленої двомасової моделі та тримасової (суцільна лінія – двомасова вдосконалена модель, пунктирна – класична двомасова модель)

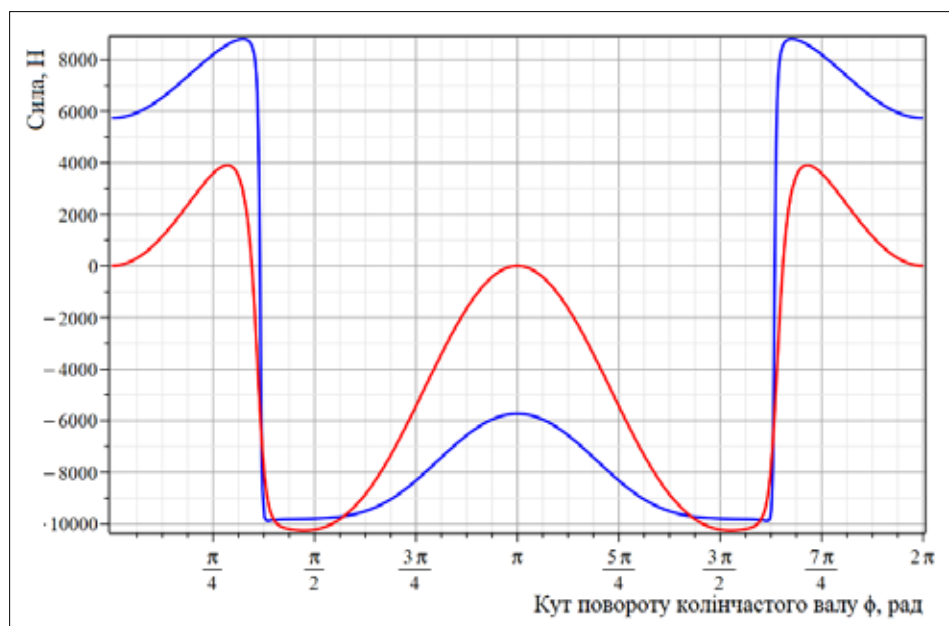


Рис. 5. Абсолютна різниця розрахунку сил реакції в крейцкопфному та шатунному підшипниках при застосуванні вдосконаленої двомасової моделі та тримасової

Висновки. Узагальнюючи результати теоретичного та чисельного аналізу, можна сформулювати розширені висновки щодо застосовності моделей динаміки КШМ:

1. Класична двомасова модель, попри свою історичну значущість, демонструє систематичну похибку у визначенні моментів інерції (до 30 %) через неможливість задовольнити три умови динамічної еквівалентності одночасно. Це робить її непридатною для прецизійних задач сучасної діагностики, де критичним є точне визначення бічних сил та навантажень на крейцкопф.

2. Тримасова модель забезпечує повну динамічну відповідність реальному об'єкту без використання штучних коригувальних коефіцієнтів. Вона усуває «фантомні» моменти, притаманні двомасовим схемам, і дозволяє розраховувати інерційні навантаження з точністю, що наближається до FEA-методів (відхилення менше 5 %), але при цьому залишається обчислювально ефективною для роботи в реальному часі.

3. Динамічний розрахунок КШМ МОД із використанням вдосконаленої двомасової моделі забезпечує необхідну точність визначення сил інерції, але можливість появи нефізичних стрибків робить цю модель ризикованою для систем діагностики в реальному часі, оскільки система може сприйняти математичний сплеск як ударне навантаження.

4. У контексті Індустрії 4.0, тримасова модель є «золотою серединою» для ядра цифрового двійника. Вона значно швидша за методи скінченних елементів (FEA), що дозволяє використовувати її для online-моніторингу, водночас забезпечуючи фізичну достовірність, недосяжну для суто статистичних моделей (black-box). Це відкриває шлях до створення гібридних PIML-систем (Physics-Informed Machine Learning), де фізична модель навчає або коригує нейромережу.

ЛІТЕРАТУРА

1. DNV GL, Condition-Based Maintenance (CBM). Class Guideline DNVGL-CG-0224, Hamburg: DNV GL AS, 2018.
2. Liu Z., Meyendorf N., Mrad N. “The role of data fusion in predictive maintenance using digital twin”, in AIP Conference Proceedings, 2018, vol. 1949, p. 020023. doi: 10.1063/1.5034421
3. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through. *Virtual Factory Replication. White paper*. 2014. Vol. 1. P. 1–7.
4. Belousov I., Bulgakov M., Savchuk V. Modern Marine Internal Combustion Engines (Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping, vol. 8). Germany : Springer, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-49749-1
5. Радцир А. А. Теорія та розрахунок теплових двигунів. М. : ОНТИ, 1933.
6. Norton R. L. Design of Machinery: An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines, 5th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2011.
7. Марченко А. П. та ін. Двигуни внутрішнього згоряння: Т. 1: Розробка конструкцій форсованих двигунів наземного транспорту / за ред. А. П. Марченка, М. К. Рязанцева, А. Ф. Шеховцова. Харків : Прапор, 2004.
8. Bathe K. J. Finite Element Procedures, 2nd ed. Watertown : Klaus-Jurgen Bathe, 2014.
9. Bureau Veritas, Rules for the Classification of Steel Ships. Part C: Machinery, Electricity, Automation and Fire Protection. Ch. 1: Machinery. Sec. 2: Internal Combustion Engines, Paris: Bureau Veritas, 2021.
10. IACS, “UR M53. Calculation of Crankshafts for Internal Combustion Engines”, London: International Association of Classification Societies, 2011.
11. MAN Diesel & Turbo, S46ME-B8.5. Project Guide: Electronically Controlled Two-stroke Engines, Copenhagen, 2014. [Online]. Available: <https://marine.man-es.com>. [Accessed: Jan. 19, 2026].
12. Dassault Systèmes, “SolidWorks Documentation”, 2023. [Online]. Available: <https://help.solidworks.com>. [Accessed: Jan. 19, 2026].

REFERENCES

1. DNV GL. (2018). *Condition-Based Maintenance (CBM). Class Guideline DNVGL-CG-0224*. DNV GL AS.
2. Liu, Z., Meyendorf, N., & Mrad, N. (2018). The role of data fusion in predictive maintenance using digital twin. *AIP Conference Proceedings*, 1949 (1), 020023. <https://doi.org/10.1063/1.5034421>
3. Grieves, M. (2014). *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication* (White paper, Vol. 1, pp. 1–7). Florida Institute of Technology.
4. Belousov, I., Bulgakov, M., & Savchuk, V. (2020). *Modern Marine Internal Combustion Engines* (Springer Series on Naval Architecture,

- Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping, Vol. 8). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-49749-1>
5. Radtsig, A. A. (1933). *Teoriya ta rozrakhunok teplovykh dvyhuniv* [Theory and calculation of heat engines]. ONTI.
 6. Norton, R. L. (2011). *Design of Machinery: An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
 7. Marchenko, A. P., Riazantsev, M. K., & Shekhovtsov, A. F. (Eds.). (2004). *Dvyhuny vnutrishnyoho zghoryannya: Vol. 1. Rozrobka konstruktсий forsovanykh dvyhuniv nazemnoho transportu* [Internal combustion engines: Vol. 1. Development of designs for boosted engines of land transport]. Prapor.
 8. Bathe, K. J. (2014). *Finite Element Procedures* (2nd ed.). Klaus-Jurgen Bathe.
 9. Bureau Veritas. (2021). *Rules for the Classification of Steel Ships. Part C: Machinery, Electricity, Automation and Fire Protection. Chapter 1: Machinery. Section 2: Internal Combustion Engines*. Bureau Veritas.
 10. IACS. (2011). *UR M53. Calculation of Crankshafts for Internal Combustion Engines*. International Association of Classification Societies.
 11. MAN Diesel & Turbo. (2014). *S46ME-B8.5. Project Guide: Electronically Controlled Two-stroke Engines*. <https://marine.man-es.com>
 12. Dassault Systèmes. (2023). *SolidWorks Documentation*. <https://help.solidworks.com>

Дата першого надходження статті до видання: 21.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

**ДІАГНОСТУВАННЯ ДЕФЕКТІВ РОТОРІВ СУДНОВИХ
ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ, ПОВ'ЯЗАНИХ З РОЗБАЛАНСУВАННЯМ,
ПІД ЧАС ЇХНЬОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

В.І. Свиридов¹, Н.Б. Андрєєва², О.І. Соломенцев³

¹к.т.н., доцент кафедри суднового машинобудування та енергетики, Херсонський
навчально-науковий інститут,

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
м. Херсон, Україна

ORCID ID: 0000-0002-4841-7935

²к.п.н., доцент кафедри теплотехніки, Херсонський навчально-науковий інститут,
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,

м. Херсон, Україна

ORCID ID: 0009-0007-8427-3207

³д.т.н., професор кафедри суднового машинобудування та енергетики,
Херсонський навчально-науковий інститут,

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
м. Херсон, Україна

ORCID ID: 0000-0002-5106-6486

Анотація

Вступ. Ротор – це один з основних елементів суднових механізмів, таких як електричні машини різних типів, турбіни, компресори, насоси, якірно-швартові пристрої тощо. Від вчасного виявлення дефектів та несправностей роторів залежить ефективна та безвідмовна експлуатація суднової енергетичної установки та судна в цілому. Розбалансування, розцентрування, порушення цілності посадки окремих вузлів ротора, що відбуваються під дією тривалого впливу змінних сил, призводять до збільшення вібрації та ймовірності відмови усього устаткування. Тому питанням діагностування технічного стану роторів приділяється велика увага. Таким чином, актуальність даного дослідження зумовлена активним впровадженням концепцій надійності та безпеки судноплавства, а також появою сучасних методів діагностування основних вузлів суднового насосного устаткування. **Мета.** Дана стаття, яка має оглядовий характер, розширює уявлення про насосне устаткування як об'єкт діагностування за параметрами вібрації. Основною її метою є системний аналіз існуючих методів діагностики суднових насосів і, зокрема, роторів, а також визначення переваг та обмежень цих методів в умовах морської експлуатації. **Результати.** Основним дефектом ротора є його неврівноваженість. Під неврівноваженістю ротора, який розглядається як абсолютно тверде тіло, розуміється відхилення, а саме розбіжність його головної центральної осі інерції і осі обертання. Залежно від розподілу мас будь-якого ротора при його обертанні розрізняють виникнення неврівноваженості трьох видів: статичної, моментної, динамічної. Найбільш небезпечною є динамічна неврівноваженість ротора, яка характеризується наявністю одночасно статичної та моментної його неврівноваженостей. При обертанні



неврівноваженого ротора відцентрові сили, що виникають, створюють змінні тиски на його опори (через підшипники). Саме тому завдання балансування ротора полягає в досягненні такого розподілу коригувальних мас на роторі, при якому вібрації опор не перевищуватимуть норм, що допускаються, у всьому діапазоні частот обертання ротора (від нуля до робочої частоти обертання). **Висновки.** Першим етапом оцінювання технічного стану підшипників та інших вузлів і деталей суднового насосного устаткування за параметрами їх вібрації має бути визначення ступеня нерівноваженості ротора. На підставі виконаного аналізу представлені прикладні рекомендації щодо підвищення ефективності технічного моніторингу суднового насосного обладнання.

Ключові слова: суднове устаткування, відцентровий насос, ротор, ось інерції, маса ротора, розцентрування, вібрація, нерівноваженість.

DIAGNOSIS OF ROTOR DEFECTS OF MARINE CENTRIFUGAL PUMPS RELATED TO UNBALANCE DURING THEIR OPERATION

V.I. Svyrydov¹, N.B. Andriieva², O.I. Solomyentsev³

¹Ph.D., Associate Professor at the Department of Ship Engineering and Power Engineering,
Kherson Educational and Research Institute,
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-4841-7935

²Ph.D., Associate Professor at the Department of Heat Engineering,
Kherson Educational and Research Institute,
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine
ORCID ID: 0009-0007-8427-3207

³Doctor of Science, Professor at the Department of Ship Engineering and Power Engineering,
Kherson Educational and Research Institute,
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-5106-6486

Summary

Introduction. The rotor is one of the main elements of ship mechanisms, including electrical machines of various types, turbines, compressors, pumps, anchor and mooring devices, among others. The practical and trouble-free operation of the ship's power plant and the ship as a whole depends on the timely detection of defects and malfunctions of the rotors. Unbalance, misalignment, and poor fit of individual rotor components, which occur under the influence of prolonged alternating forces, lead to increased vibration and the likelihood of failure of the entire equipment. Therefore, much attention is paid to diagnosing the technical condition of rotors. Thus, the relevance of this study lies in the active implementation of concepts of ship reliability and safety, as well as the emergence of modern methods for diagnosing the main nodes of ship pumping equipment. **Purpose.** This article, which is a review, extends the idea of using vibration parameters for diagnosing pumping equipment. Its main goal is to systematically analyze existing methods for diagnosing ship pumps, particularly rotors, and to determine their advantages and limitations in marine operations. **Results.** The primary defect of the rotor is its imbalance. The imbalance of the rotor, which is considered an absolutely solid body, is understood as a deviation, namely, the divergence of its main central axis of inertia from the axis of rotation. Depending on the distribution

*of masses of any rotor during its rotation, three types of imbalance are distinguished: static, momentary, and dynamic. The most dangerous is the dynamic imbalance of the rotor, characterized by the presence of both static and moment imbalances. When the unbalanced shaft rotates, the centrifugal forces that arise create variable pressures on its supports (through bearings). That is why the task of balancing the rotor is to achieve a distribution of corrective masses on the rotor that prevents the vibrations of the supports from exceeding the permissible norms over the entire range of rotor rotation frequencies (from zero to the operating speed). **Conclusions.** The first stage in assessing the technical condition of bearings and other components and parts of ship pumping equipment, based on their vibration parameters, is to determine the degree of rotor unbalance. Based on the analysis, the following recommendations are presented to increase the efficiency of technical monitoring of ship pumping equipment.*

Key words: ship equipment, centrifugal pump, rotor, axis of inertia, rotor mass, misalignment, vibration, unbalance.

Вступ

Надійність функціонування суднових допоміжних систем безпосередньо залежить від ефективності діагностики насосного обладнання, у першу чергу, роторів. Ротор – це основна частина механізму, що обертається, яка є в різних суднових пристроях, таких як електричні машини, турбіни, компресори, насоси, а також у багатьох інших механізмах. Його основна функція полягає в перетворенні механічної, електричної або інших форм енергії в обертальний рух. Ротор може бути виконаний у різних формах і розмірах залежно від конкретного застосування, а його конструкція часто залежить від типу двигуна чи машини, в якій його конструктивно планують використовувати [1].

Робота ротора ґрунтується на двох складових, на принципах механічних і динамічних сил, а при обертанні ротора виникають потужні відцентрові сили. Ці сили впливають на опори ротора, й останньою точкою прикладених сил є підшипники опор ротора. Незалежно від того, чи є вони шарикопідшипниками чи підшипниками ковзання, саме ці вузли сприймають збільшені навантаження, що призводить до зменшення поверхневої плівки на тілі підшипника та викликає тимчасове поверхнєве нагрівання підшипника. Як результат, відбувається погіршення експлуатаційних показників підшипникового вузла, що в кінці кінців може спричинити його руйнування.

Актуальність дослідження зумовлена впровадженням концепцій надійності та безпеки судноплавства, а також використанням сучасних методів діагностування основних вузлів насосного устаткування.

Метою статті є системний аналіз існуючих методів діагностики суднових насосів, і зокрема ротора, та визначення їх переваг та обмежень в умовах морської експлуатації, а також формування прикладних рекомендацій щодо підвищення ефективності технічного моніторингу насосного обладнання. Методологія проведення дослідження передбачала критичний огляд літератури із подальшою класифікацією та порівняльним аналізом методів діагностики за критеріями точності, оперативності, адаптивності та інтеграції у суднові системи. Розглянуто як традиційні (вібраційний, тепловий, параметричний контроль тощо), так і сучасні

підходи, зокрема методи на основі використання технологій штучного інтелекту.

Постановка проблеми

Розбалансування, розцентрування, порушення щільності посадки окремих вузлів ротора відбуваються під дією тривалого впливу змінних сил, які впливають на підшипники опор, що є головним критерієм роботоздатності насосного устаткування, і призводять до збільшення вібрації [2].

При розцентруванні та прогинанні ротора значно збільшується вібрація на другій гармоніці частоти обертання, при ослабленні щільності посадки вузлів ротора в підшипниковому вузлі, та загальному ослабленні кріпильних деталей у спектрі вібрації машини зазвичай проявляються гармоніки кратності $1/2$; $1\ 1/2$; $2\ 1/2$ і т.п. [3; 4].

Ось чому завжди потрібно приділяти увагу врівноваженості усіх цих сил, які виникають при обертанні ротора [5–7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У вітчизняній і зарубіжній науковій літературі накопичено значний масив досліджень, присвячених питанням діагностики та надійності суднових технічних систем та устаткування [8–11]. Зокрема, С. Тараненко та С. Голубєва розглянули використання логіко-ймовірнісного підходу «дерева відмов» для аналізу надійності електродвигунів, які є складовими насосних агрегатів, проте не охоплюють увесь спектр характеристик насоса як об'єкта діагностики [10]. Подібна тематика розглядається і в публікаціях даних авторів, де головна увага приділена загальним показникам надійності електричних систем [2; 5; 6; 12; 13].

Актуальним напрямом при діагностуванні дефектів роторів суднових допоміжних механізмів є застосування інтелектуальних систем на основі математичних моделей і машинного навчання. У цьому аспекті заслуговують на увагу праці О. Шарка (O. Sharko) та А. Яненка (A. Yanenko), які моделюють програмне забезпечення діагностики на базі ланцюгів Маркова [14].

Але аналіз літератури свідчить про відсутність комплексного підходу до аналізу насосів, у першу чергу відцентрових, як окремої групи допоміжного обладнання, що вказує на актуальність подальших досліджень у вказаній тематиці.

Формулювання завдань статті

Для досягнення поставленої мети в межах статті вирішуються такі основні завдання:

- 1) дослідити типові методи діагностики, які застосовуються в практиці технічного обслуговування суднових насосів;
- 2) проаналізувати переваги та недоліки методів діагностики судових насосів у контексті умов експлуатації на флоті, враховуючи критерії точності, оперативності, адаптивності та технологічної інтеграції;
- 3) запропонувати рекомендації щодо вдосконалення діагностики суднових насосів для підвищення ефективності превентивного технічного обслуговування у складі суднових допоміжних систем.

Виклад основного матеріалу

Технічне обслуговування суднових насосів спирається на широкий спектр методів контролю їхнього стану. Вібраційний аналіз наразі визнаний ключовим інструментом для раннього виявлення механічних дефектів насосів (небаланс, зношення підшипників тощо) та є найбільш розповсюдженим видом діагностики

насосного агрегату. Це пояснюється тим, що при зародженні несправності внутрішніх частин насоса змінюються динамічні характеристики вузлів, що відображається у вібраційних сигналах. Обробляючи ці сигнали методами спектрального чи часово-частотного аналізу, можна виокремити ознаки дефекту та оцінити його розвиток.

Основним дефектом ротора є його невірноваженість, і його можна контролювати, використовуючи різноманітні сенсорні методи моніторингу параметрів, серед яких найпоширенішою є вібраційна діагностика [15, 16].

Невірноваженістю ротора, що розглядається як абсолютно тверде тіло, називається розбіжність його головної центральної осі інерції з віссю обертання [17]. Залежно від розподілу мас ротора розрізняють невірноваженість трьох видів: статичну, моментну, динамічну.

Статична невірноваженість ротора має місце, коли головна вісь інерції проходить через центр мас ротора, залишаючись паралельною осі обертання O_x (рис. 1, а). У цьому випадку всі невірноважені сили інерції, наведені до центру мас ротора, що обертається, дають тільки головний вектор $R_{ст}$; головний момент дорівнює нулю.

Така невірноваженість може бути виявлена без обертання ротора як в заводських умовах, так і на судні, а конкретно на конусних паралелях. При обертанні симетричного ротора в цьому випадку до підшипників прикладені дві рівні й однаково спрямовані сили, що сбурюють.

Моментна невірноваженість ротора виникає, коли головна вісь інерції перетинає вісь обертання у центрі мас (див. рис. 1, б). У цьому випадку всі невірноважені сили інерції, приведені до центру мас ротора, що обертається, дають тільки головний момент $R_{дин} \times L_1$; головний вектор дорівнює нулю.

Ця невірноваженість виявляється тільки при обертанні ротора, коли виникає момент, який сбурює, що створює обертальні коливання ротора щодо поперечної осі, яка проходить через центр мас [6].

Динамічна невірноваженість ротора характеризується наявністю одночасно статичної та моментної невірноваженостей ротора (рис. 1, в).

Але при обертанні ротора може виникнути дисбаланс, а це є порушення рівноваги, гармонії або збалансованості в системі, яке може проявлятися по-різному: в механічному обладнанні як невірноваженість обертових мас [1].

Дисбалансом називається вектор, рівний добутку невірноваженої маси на радіус-вектор її центру щодо осі ротора, який називається ексцентриситетом центру маси.

Напрямок дисбалансу збігається з напрямком ексцентриситету. Головний вектор дисбалансів ротора D дорівнює сумі всіх векторів-дисбалансів ротора і обертається разом із ротором.

Статична невірноваженість ротора повністю визначається головним вектором дисбалансів $D_{ст}$, або ексцентриситетом центру маси ротора $e_{ст}$, або відносним зміщенням головної центральної осі інерції та осі ротора, рівним значенню ексцентриситету центру маси $e_{ст}$.

Значення $e_{ст}$, що дорівнює відношенню модуля D головного вектора дисбалансів до маси ротора M , називається також питомим дисбалансом, оскільки визначає дисбаланс, що припадає на 1 кг маси ротора.

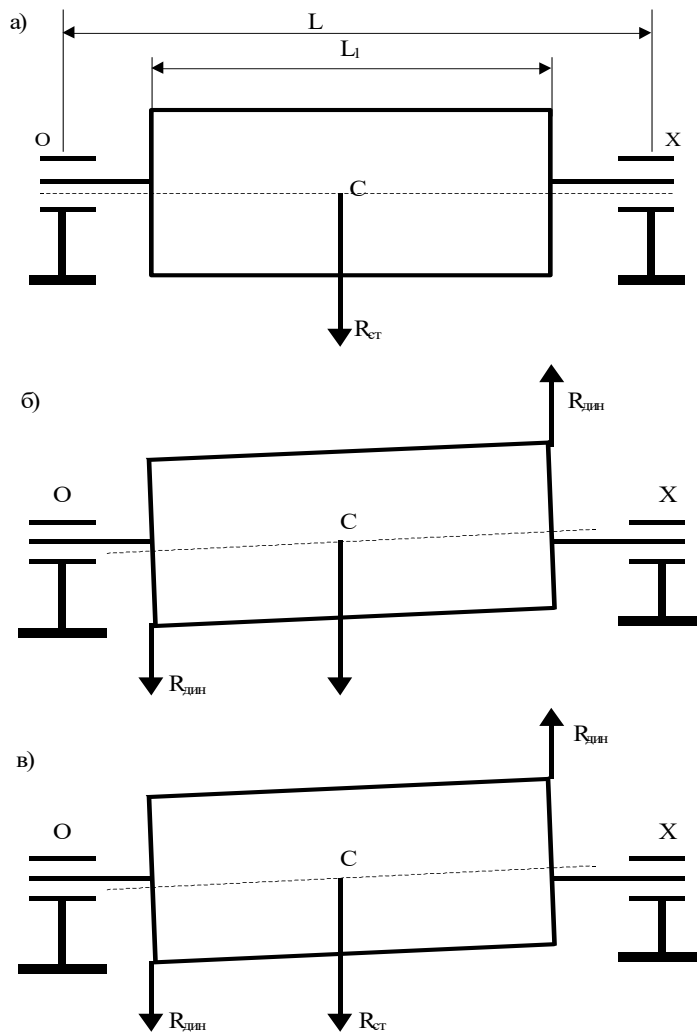


Рис. 1. Види нерівноваженості твердого ротора:
а) статична; б) моментна; в) динамічна

При обертанні нерівноваженого валу відцентрові сили, що виникають, створюють змінні тиски на його опори (через підшипники). Оскільки жорсткість будь-якої опори у реальному працюючому насосному обладнанні або в електричній машині не може бути нескінченною, ці тиски викликають вібрації нерівноваженого валу [12, 13].

Ось чому завдання балансування ротора полягає в тому, щоб досягти такого розподілу коригувальних мас на роторі, при якому вібрації опор не перевищуватимуть норм, що допускаються, у всьому діапазоні частот обертання ротора (від нуля до робочої частоти обертання) [17, 18].

Висновки.

Забезпечення надійної і безперервної роботи суднових насосів є критично важливою умовою стабільного функціонування допоміжних систем судна.

Враховуючи високий ступінь зношування насосного обладнання в умовах експлуатації на флоті, актуальність дослідження методів їх діагностики не викликає сумнівів. Насосне обладнання як об'єкт діагностування є складною системою, в якій найбільш відповідальним вузлом є ротор, який, як правило, лімітує його ресурс.

Практично всі види дефектів та несправностей вузлів і деталей суднового насосного обладнання можна визначити за параметрами вібрації. Однак вібрація, яку використовують для діагностичних цілей, залежить від параметрів функціонування насосного обладнання та конструктивних особливостей місця його встановлення та кріплення

Перш ніж перейти до оцінювання технічного стану підшипників та інших вузлів і деталей насосного устаткування за параметрами їх вібрації, необхідно визначити ступінь неврівноваженості ротора (його норми) та, при необхідності, зробити його підбалансування.

Ось чому балансування ротора є однією з найважливіших умов, щоб досягти такого розподілу коригувальних мас на роторі, при якому вібрації опор не перевищуватимуть норм, що допускаються, у всьому діапазоні частот обертання ротора (від нуля до робочої частоти обертання).

ЛІТЕРАТУРА

1. Kostyshyn V. S., Yaremak I. I. Mathematical model of reliability and efficiency of the pumping unit of an oil pumping station. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2017. № 5 (161). С. 62–68. https://www.researchgate.net/publication/321157763_Mathematical_model_of_reliability_and_efficiency_of_pumping_unit_of_an_oil_pumping_station
2. Свиридов В. І., Андреев А. А., Андреев А. А. Аналіз впливу граничних рівнів вібрації на залишковий ресурс суднових машин і механізмів. *Розвиток транспорту*. 2023. № 4 (19). С. 125–139. <https://doi.org/10.33082/td.2023.4-19.10>
3. Костишин В. С., Яремак І. І. Аналіз показників ефективності та надійності роботи насосного агрегата на засадах системного підходу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2017. № 1 (62). С. 50–60. <https://pdogf.com.ua/uk/journals/1-62>
4. Особливості діагностичного контролю технічного стану обладнання засобів річкового та морського транспорту : монографія / за загальною редакцією О. А. Дакі. Київ : Державний університет інфраструктури та технологій, 2021. 228 с.
5. Свиридов В. І., Попов І. М. Дослідження підшипникових вузлів насосного обладнання та механізмів через вібраційні показники. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. Херсон : ХНТУ, 2017. Т. 1, Вип. 3 (62). С. 338–344. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtu_2017_3\(1\)_61](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtu_2017_3(1)_61)
6. Свиридов В. І., Фальченко О. П. Діагностування суднового устаткування при використанні різних моделей вібрації. *Прикладні питання*

- математичного моделювання. 2019. Т. 2, № 2. С. 78–90. <https://doi.org/10.32782/2618-0340/2019.2-2.7>
7. ISO 13373-1:2002. Condition monitoring and diagnostics of machines. Vibration condition monitoring. Part 1: General procedures. <https://www.iso.org/ru/standard/21831.html>
 8. Мельник О. В., Сорока В. В. Вібродіагностика головної енергетичної установки суден: вдосконалення та інтеграція методів. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2023. Вип. 47. С. 349–359. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300121>
 9. Cabuk A. S. Experimental IoT study on fault detection and preventive apparatus using Node-RED ship's main engine cooling water pump motor. *Engineering Failure Analysis*. 2022. 138 (7-8), article 106310. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106310>
 10. Тараненко С. В., Голубева С. М. Аналіз показників надійності суднових електродвигунів, що використовуються у сучасному судновому обладнанні. *Водний транспорт*. 2021. № 2 (33). С. 5–12. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.2.33.01>
 11. Холденко В. І. Аналіз існуючих методів діагностики суднових насосів. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. Херсон: ХНТУ, 2025. Т. 1, № 2 (93). С. 280–286. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.36>
 12. Свиридов В. І. Діагностування електричних агрегатів та енергетичного обладнання методом третьоктавного аналізу вібрації. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. Херсон: ХНТУ, 2015. № 3 (54). С. 643–648. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtu_2015_3_124
 13. Свиридов В. І. Аналіз основних дефектів при роботі насосних агрегатів. *Водний транспорт*. 2015. Вип. 1. С. 38–44. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vodt_2015_1_9
 14. Sharko O., Yanenko A. Modeling of intelligent software for the diagnosis and monitoring of ship power plant components using Markov chains. *Science-Based Technologies*. 2023. Vol. 59, No 3. P. 251–261. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.59.17946>
 15. ISO 13373-2:2016. Condition monitoring and diagnostics of machines – Vibration condition monitoring. Part 2: Processing, analysis and presentation of vibration data. <https://www.iso.org/standard/68128.html>
 16. Яворський І. М. Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань / за заг. ред. акад. НАН України З. Т. Назарчука. Львів : ФМІ НАНУ, 2013. 804 с. https://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=EC&P21DBN=EC&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=JwU_B&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=U&S21COLORTERMS=0&S21STR=%D0%92213.305%20%D0%B2647.1
 17. Xu X., Yan X., Yang K., Zhao J., Sheng C., Yuan C. Review of condition monitoring and fault diagnosis for marine power systems. *Transportation*

Safety and Environment. 2021. Vol. 3, No. 2. P. 85–102. <https://doi.org/10.1093/tse/tdab005>

18. Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики : монографія / В. П. Бабак, С. В. Бабак, В. С. Берегун та ін. ; за ред. чл.-кор. НАН України В. П. Бабака. Київ : Ін-т техн. теплофізики НАН України, 2015, 512 с. https://itf.kiev.ua/wp-content/uploads/2016/02/babak_monografia2015.pdf

REFERENCES

1. Kostyshyn, V. S., Yaremak, I. I. (2018). Mathematical model of reliability and efficiency of pumping unit of an oil pumping station. *Scientific Bulletin of the National Mining University*, № 5 (161), 62–68. https://www.researchgate.net/publication/321157763_Mathematical_model_of_reliability_and_efficiency_of_pumping_unit_of_an_oil_pumping_station
2. Svyrydov, V. I., Andreiev, A. A., & Andrieiev, A. A. (2023). Analysis of the impact of limit vibration levels on the residual life of ship machinery and mechanisms [Analiz vplyvu hranychnykh rivniv vibratsiyi na zalyshkovyyu resurs sudnovykh mashyn i mekhanizmiv. *Transport Development*, № 4 (19), 125–139. <https://doi.org/10.33082/td.2023.4-19.10> [in Ukrainian].
3. Kostyshyn, V. S., Yaremak, I. I. (2017). Analysis of the efficiency and reliability of the pumping unit based on a systems approach [Analiz pokaznykiv efektyvnosti ta nadiynosti roboty nasosnoho ahrehata na zasadakh systemnoho pidkhotu. *Exploration and development of oil and gas fields*, № 1 (62), 50–60. <https://pdogf.com.ua/uk/journals/1-62> [in Ukrainian].
4. (2021). Peculiarities of diagnostic control of the technical condition of river and sea transport equipment [Osoblyvosti diahnostychnoho kontrolyu tekhnichnoho stanu obladnannya zasobiv richkovoho ta mors'koho transportu]: monograph / edited by O. A. Daki. Kyiv: State University of Infrastructure and Technologies, 228 p. [in Ukrainian]
5. Svyrydov, V. I., Popov, I. M. (2017) Research of bearing units of pumping equipment and mechanisms through vibration indicators [Doslidzhennya pidshypnykovykh vuzliv nasosnoho obladnannya ta mekhanizmiv cherez vibratsiyini pokaznyky. *Bulletin of Kherson National Technical University*. Kherson: KhNTU, V. 1, 3 (62), 338–344. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtu_2017_3\(1\)_61](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtu_2017_3(1)_61) [in Ukrainian].
6. Svyrydov, V. I., Falchenko, O. P. (2019) Diagnostics of ship equipment using various vibration models [Diahnostuvannya sudnovoho ustatkuvannya pry vykorystanni riznykh modeley vibratsiyi. *Applied issues of mathematical modelling*, V. 2, № 2, 78–90. <https://doi.org/10.32782/2618-0340/2019.2-2.7> [in Ukrainian].
7. ISO 13373-1:2002. (2002). Condition monitoring and diagnostics of machines. Vibration condition monitoring. Part 1: General procedures. <https://www.iso.org/ru/standard/21831.html>
8. Melnyk, O., Soroka, V. (2023). Vibration diagnostics of ship main power plants: improvement and integration of methods [Vibrodiagnostyka

- holovnoi enerhetychnoi ustanovky suden: vdoskonalennia ta intehtratsiia metodiv. *Bulletin of the Azov State Technical University*. Series: Technical Sciences, 47, 349–359. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300121> [in Ukrainian].
9. Cabuk A. S. (2022). Experimental IoT study on fault detection and preventive apparatus using Node-RED ship's main engine cooling water pump motor. *Engineering Failure Analysis*, 138 (7-8), article 106310. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106310>
 10. Taranenko S.V., Golubieva S.M. (2021). Analysis of reliability indicators of marine electric motors used in modern ship equipment [Analiz pokaznykiv nadiynosti sudnovykh elektrodvyhuniv, shcho vykorystovuyut'sya u suchasnomu sudnovomu obladnanni. *Water transport*, 2 (33), 5–12. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.2.33.01> [in Ukrainian].
 11. Kholdenko V. I. (2025). Analysis of existing methods for diagnostic of ship pumps [Analiz isnuuyuchykh metodiv diahnostryky sudnovykh nasosiv. *Bulletin of Kherson National Technical University*. Kherson: KhNTU, V. 1, 2 (93), 280–286. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.36> [in Ukrainian].
 12. Svyrydov, V. I. (2015). Diagnostics of electrical units and power equipment using the method of third-octave vibration analysis [Diahnostuvannya elektrychnykh ahrehativ ta enerhetychnoho obladnannya metodom tret'oktavnoho analizu vibratsiyi. *Bulletin of the Kherson National Technical University*. Kherson: KhNTU, № 3 (54), 643–648. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtu_2015_3_124 [in Ukrainian].
 13. Svyrydov, V. I. (2015). Analysis of the main defects in the operation of pumping units [Analiz osnovnykh defektiv pry roboti nasosnykh ahrehativ. *Water transport*, 1, 38–44. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vodt_2015_1_9 [in Ukrainian].
 14. Sharko, O., Yanenko, A. (2023). Modeling of intelligent software for the diagnosis and monitoring of ship power plant components using Markov chains. *Science-Based Technologies*, 59 (3), 251–261. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.59.17946>
 15. ISO 13373-2:2016. (2016). Condition monitoring and diagnostics of machines – Vibration condition monitoring. Part 2: Processing, analysis and presentation of vibration data. <https://www.iso.org/standard/68128.html>
 16. Javorskyj, I. M. (2013) Mathematical models and analysis of stochastic oscillations [Matematychni modeli ta analiz stokhastychnykh kolyvan'] / Under the general editorship of Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine Z. T. Nazarchuk. Lviv: Faculty of Mathematics and Natural Sciences of the National Academy of Sciences, 804 p. https://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=EC&P21DBN=EC&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=JwU_B&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=U=&S21COLORT-ERMS=0&S21STR=%D0%92213.305%20%D0%B2647.1 [in Ukrainian].

17. Xu, X., Yan, X., Yang, K., Zhao, J., Sheng, C., & Yuan, C. (2021). Review of condition monitoring and fault diagnosis for marine power systems. *Transportation Safety and Environment*, vol. 3, No. 2, 85–102. <https://doi.org/10.1093/tse/tdab005>
18. (2015). Information support for monitoring of heat power facilities [Informatsiyne zabezpechennya monitorynhu ob'ektiv teploenerhetyky]: Monograph / V. P. Babak, S. V. Babak, V. S. Beregun and others; edited by Corresponding Member of the NAS of Ukraine V. P. Babak. Kyiv, Institute of Technical Thermal Physics of the NAS of Ukraine, 512 p. https://itf.kiev.ua/wp-content/uploads/2016/02/babak_monografia2015.pdf [in Ukrainian].

Дата першого надходження статті до видання: 29.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 629.735.4:656.073:504.06

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2026.1-28.09>

БЕЗПІЛОТНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТ ОПТИМІЗАЦІЇ ГУМАНІТАРНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

І.М. Герасименко¹, С.В. Пронь², О.В. Пронь³

¹к.е.н., доцент, доцент кафедри транспортних технологій і систем
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна
ORCID ID: 0000-0002-4297-3973

²к.т.н., доцент, доцент кафедри транспортних технологій і систем
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна
ORCID ID: 0000-0002-1177-9588

³аспірант,
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна
ORCID ID: 0009-0000-5693-2630

Анотація

Вступ. У сучасних умовах воєнних конфліктів, зокрема на території України, природних катастроф і техногенних аварій ефективність гуманітарних перевезень значною мірою залежить від стійкості логістичної інфраструктури та швидкості реагування. Руйнування транспортних шляхів, обмежений доступ до постраждалих територій і високі ризики для персоналу зумовлюють необхідність пошуку альтернативних логістичних рішень. Одним із перспективних напрямів є використання безпілотних літальних апаратів у системі гуманітарної логістики. **Метою** дослідження є обґрунтування доцільності застосування багаторівневої логістичної системи на основі безпілотних технологій для оптимізації гуманітарних перевезень, а також оцінка її пропускної здатності, економічної ефективності та екологічної безпеки. **Результати.** Запропоновано багаторівневу логістичну систему для перевезення гуманітарних вантажів, що поєднує магистральні безпілотні літальні апарати для міжшахових перевезень, VTOL-БПЛА для регіональної доставки та важкі мультикоптери для забезпечення «останньої милі». Проведено розрахунок добової пропускної здатності та витрат для кожного рівня логістичної системи. Встановлено, що запропонована багаторівнева система дозволяє забезпечити доставку до 2950 кг гуманітарних вантажів на добу при відносно помірних експлуатаційних витратах, забезпечуючи високу гнучкість і адаптивність логістичних процесів, що, в свою чергу, зможе врятувати не одне українське життя. Також визначено, що впровадження БПЛА технологій дозволяє знизити викиди вуглекислого газу до 60 % порівняно з традиційним транспортом, а використання повністю електричних БПЛА на локальному рівні забезпечує нульовий рівень шкідливих викидів, що суттєво підвищує



екологічну безпеку операцій у постраждалих регіонах. **Висновки.** Доведено, що використання багаторівневої логістичної системи БПЛА підвищує оперативність і безпеку гуманітарних перевезень, зменшує залежність від стану наземної інфраструктури та дозволяє мінімізувати ризики для персоналу. Запропонований підхід може бути ефективно застосований у кризових та післякризових умовах, зокрема під час гуманітарних операцій в зонах з обмеженим транспортним сполученням, таких як постраждалі райони України та відповідає принципам «зеленої логістики» і має місце для екологічно стійкого відновлення транспортного сполучення.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, гуманітарні перевезення, багаторівнева логістична система, пропускна здатність, собівартість, екологічна безпека, кризове реагування.

UNMANNED TECHNOLOGIES AS A TOOL FOR OPTIMIZING HUMANITARIAN TRANSPORTATION AND ENSURING ENVIRONMENTAL SAFETY

I.M. Herasymenko¹, S.V. Pron², O.V. Pron³

¹PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor
of the Department of Transport Technologies and Systems,
State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-4297-3973

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor
of the Department of Transport Technologies and Systems,
State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-1177-9588

³PhD student,
State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine
ORCID ID: 0009-0000-5693-2630

Summary

Introduction. In the current conditions of military conflicts, in particular on the territory of Ukraine, as well as natural disasters and technogenic accidents, the efficiency of humanitarian transportation largely depends on the resilience of logistics infrastructure and the speed of response. The destruction of transport routes, limited access to affected areas, and high risks to personnel necessitate the search for alternative logistics solutions. One of the promising approaches is the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in humanitarian logistics systems. The purpose of this study is to substantiate the feasibility of applying a multi-level logistics system based on unmanned technologies to optimize humanitarian transportation, as well as to assess its throughput capacity, economic efficiency, and environmental safety. **Results.** A multi-level logistics system for humanitarian cargo transportation is proposed, combining mainline unmanned aerial vehicles for inter-hub transportation, VTOL UAVs for regional distribution, and heavy multicopters to ensure last-mile delivery. The daily throughput capacity and operating costs for each level of the logistics system were calculated. It was found that the proposed multi-level system enables the delivery of up to **2950 kg of humanitarian cargo per day** at relatively moderate operating costs,

while providing high flexibility and adaptability of logistics processes, which, in turn, can save many Ukrainian lives. It was also determined that the implementation of UAV technologies allows for a reduction in carbon dioxide emissions by up to **60 %** compared to traditional transport, while the use of fully electric UAVs at the local level ensures zero harmful emissions, significantly enhancing the environmental safety of operations in affected regions. **Conclusions.** It has been proven that the use of a multi-level UAV-based logistics system increases the responsiveness and safety of humanitarian transportation, reduces dependence on the condition of ground infrastructure, and minimizes risks to personnel. The proposed approach can be effectively applied in crisis and post-crisis conditions, particularly during humanitarian operations in areas with limited transport connectivity, such as the affected regions of Ukraine, and complies with the principles of green logistics, contributing to environmentally sustainable restoration of transport connectivity.

Key words: unmanned aerial vehicles, humanitarian transportation, multi-level logistics system, throughput capacity, cost efficiency, environmental safety, crisis response.

Вступ. У сучасних умовах зростання кількості збройних конфліктів, природних катастроф та техногенних аварій гуманітарні перевезення набувають особливої важливості, як ключовий елемент системи реагування на надзвичайні ситуації. Оперативна доставка гуманітарної допомоги – продовольства, медикаментів, засобів першої необхідності – безпосередньо впливає на рівень виживання населення та ефективність гуманітарних місій загалом. Водночас традиційні логістичні підходи часто стикаються з низкою обмежень, зокрема пошкодженою транспортною інфраструктурою, високими ризиками для персоналу, обмеженим доступом до віддалених або небезпечних територій.

У зв'язку з цим актуалізується потреба у впровадженні інноваційних технологічних рішень, здатних підвищити швидкість, безпеку та економічну ефективність гуманітарних перевезень. Одним із таких перспективних напрямів є використання безпілотних літальних апаратів, які відкривають нові можливості для оптимізації логістичних процесів. Завдяки автономності, мобільності та здатності працювати в складних умовах безпілотні технології дозволяють мінімізувати часові витрати, зменшити залежність від стану дорожньої мережі та знизити ризики для людських ресурсів.

Постановка проблеми. Через повномасштабне вторгнення рф, Україна потерпає від масованих ракетних та артилерійських обстрілів населених пунктів, що є причиною загибелі багатьох людей, руйнувань житлових будинків, об'єктів інфраструктури, в тому числі критичної, та призводить до паливно-енергетичної кризи, порушення процесів забезпечення населення продуктами харчування, непродовольчими товарами першої необхідності, ліками, загострюючи гуманітарні потреби мільйонів людей. Зважаючи на це, в умовах сьогодення, постає значна проблема гуманітарного забезпечення населення. Таким чином, дослідження потенціалу безпілотних технологій у сфері гуманітарних перевезень є актуальним науково-практичним завданням, що відповідає сучасним викликам та потребам гуманітарної логістики.

Виходячи з вищенаведеного, наукове та практичне значення проблеми полягає в необхідності вирішення наступних завдань:

- проаналізувати стан та виклики сучасної гуманітарної логістики в Україні в умовах воєнного стану та обґрунтувати необхідність впровадження безпілотних технологій;
- розробити концепцію багаторівневої логістичної системи на основі різних типів БПЛА (магістрального, регіонального та локального рівнів);
- розрахувати добову пропускну здатність запропонованої системи для оцінки її операційної ефективності;
- провести порівняльний економічний аналіз собівартості перевезень на різних рівнях логістичного ланцюга;
- оцінити екологічний ефект від впровадження безпілотних технологій у контексті концепції «зеленої логістики».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питаннями, пов'язаними із організацією доставки вантажів гуманітарної допомоги, а також використанням авіаційного компонента в логістичних системах, займалася низка вітчизняних науковців, таких як: Григорак М. Ю., Григоренко О.В., Гринів Н. Т., Кабанова О. О., Колосок Е. В., Лифар В. В., Метенко А.С., Мікуліна М. О., Мироненко В. К., Позднякова Л. О., Равликівська А. А., Репіч Т. А., Рудь Ю. Л., Сапіга Р. І., Смирнова І. Г., Ступницький О. І., Чуприна О. О. [1–3; 9–13]. Але в наведених працях не враховані реалії українського сьогодення: повномасштабне вторгнення РФ на територію України та, як наслідок, безліч надзвичайних ситуацій у великих містах та маленьких містечках; селах та селищах; значна частина населення постраждалих регіонів, це люди, яким потрібна допомога. У цих наукових працях досліджено організацію перевезень гуманітарних вантажів різними видами транспорту. Організація доставки гуманітарних вантажів за допомогою безпілотних літальних апаратів висвітлена недостатньо та потребує вдосконалення.

Формулювання цілей статті. Основними цілями статті є дослідження та комплексна оцінка ефективності різних видів безпілотних літальних апаратів як інструменту доставки гуманітарної допомоги в умовах воєнного часу.

Виклад основного матеріалу. Сьогодні безпілотні літальні апарати ширше, ніж будь-коли раніше, застосовують як у цивільній, так і у військовій сферах. Так, різні види БПЛА все частіше використовують у логістиці, для контролю технічного стану, безпеки та процесів функціонування різних об'єктів і систем, зокрема у сфері захисту довкілля, аграрному секторі, лісовому господарстві, на залізничному транспорті, при організації морських пошуково-рятувальних операцій, для потреб поліції, у проти-пожежних роботах, для інспекції стану конструкцій, трубопроводів тощо.

У багатьох країнах світу застосовують БПЛА для перевезення гуманітарних вантажів, наприклад: Гана – застосовують БПЛА для регулярної доставки крові та вакцин; Вануату – застосовують БПЛА для доставки вакцин у віддалені селища на островах; США, ЄС – для пілотних програм доставки медикаментів під час стихійних лих; Україна – у волонтерських програмах доставки медикаментів у зони складної логістики.

Використання безпілотних літальних апаратів для перевезення гуманітарних вантажів дедалі активніше застосовується у світі завдяки їхній мобільності,

доступності та здатності працювати там, де традиційний транспорт недоступний або небезпечний.

Основними сферами застосування безпілотних літальних апаратів є:

1. Доставка медикаментів і медичних зразків
 - транспортування донорської крові, вакцин, антибіотиків;
 - доставка лабораторних зразків у важкодоступні регіони;
 - екстрена доставка в зони стихійних лих чи ізоляції.
2. Доставка продуктових наборів та засобів першої необхідності
 - в райони, заблоковані через руйнування доріг;
 - у гірські чи затоплені території;
 - у віддалені населені пункти.
3. Підтримка пошуково-рятувальних робіт
 - доставка води, теплих ковдр та засобів виживання людям, яких не можуть

швидко евакуювати.

Основними перевагами застосування БПЛА при перевезенні гуманітарних вантажів є [4–6]:

1. Швидкість реагування

БПЛА можуть долати маршрути у 2–10 разів швидше за наземний транспорт у складних умовах.

2. Доступ до важкодоступних районів
 - зони повеней;
 - території після землетрусів;
 - місця з відсутньою або пошкодженою інфраструктурою;
 - зони військових дій.
3. Низька вартість та автономність
 - менше пального;
 - автоматизоване планування маршрутів;
 - можливість працювати без великої кількості персоналу.
4. Безпечність для персоналу

Не потрібно ризикувати життям волонтерів або медиків при доставці.

5. Екологічна стійкість

Перехід на безпілотні технології дозволяє суттєво знизити обсяги викидів вуглекислого газу та оксидів азоту порівняно з використанням вантажних автомобілів, особливо на маршрутах зі зруйнованою інфраструктурою, де традиційний транспорт змушений використовувати обхідні шляхи.

Також є деякі недоліки [7, 8] при використанні БПЛА для перевезення гуманітарних вантажів, це стосується технічних обмежень, таких як:

1. Обмежена вантажопідйомність
 - більшість легких БПЛА перевозять 1–5 кг,
 - спеціалізовані вантажні БПЛА перевозять 20–200 кг, але вони дорожчі та масивні.
2. Радіус дії та автономність
 - Залежить від моделі БПЛА, як правило, 5–100 км. Потребує станцій підзарядки.
3. Погодні умови
 - Сильний вітер, дощ, мороз можуть знизити можливості БПЛА.

При застосуванні БПЛА також існують проблеми регуляторного характеру, такі як:

1. Необхідність дозволів

У більшості країн польоти БПЛА потребують:

- дозвіл авіаційних органів;
- реєстрацію обладнання;
- дотримання правил безпеки польотів.

Застосування безпілотних літальних апаратів істотно підвищує оперативність та результативність доставки гуманітарних вантажів, зокрема в умовах надзвичайних ситуацій. В умовах збройної агресії російської федерації проти України зазначені умови істотно ускладнюються внаслідок систематичних ракетно-дронових обстрілів, спрямованих на ураження критичної інфраструктури України, зокрема, припортової інфраструктури Одеської області.

У військовому вимірі такі удари є елементом стратегії РФ, спрямованої на поступове виснаження можливостей української протиповітряної оборони та знищення об'єктів критичної інфраструктури. Атаки переважно здійснюються в нічний період із залученням різних типів засобів ураження. Противник застосовує комбіновану тактику, поєднуючи дрони-камікадзе Shahed-136/131 із крилатими ракетами різного типу, зокрема Х-22, «Онiкс», «Калiбр», а також балістичне озброєння. Основними цілями ударів залишаються об'єкти портової інфраструктури Одеської області – зернові термінали, складські приміщення та логістичні вузли, а також енергетичні об'єкти, агропромислові підприємства і житлова забудова.

Атаки на прибережні території мають на меті не лише завдання матеріальних збитків, а й створення психологічного тиску та порушення функціонування морських шляхів експорту, зокрема так званого «зернового коридору».

З гуманітарної точки зору, ситуація описується як кризова і така, що спричиняє значні страждання для цивільного населення. Регулярні атаки призводять до знищення житлових будинків, об'єктів критичної інфраструктури, історичних будівель та культурної спадщини. На жаль, обстріли регулярно призводять до поранень та загибелі мирних жителів. Населення регіону живе в умовах хронічного стресу, що негативно впливає на психічне здоров'я та якість життя. Повітряні тривоги стали повсякденною реальністю.

Обстріли півдня України – це регулярні, комбіновані ракетно-дронові удари, які несуть руйнування критичної інфраструктури та цивільного житла, спричиняючи гуманітарну кризу та постійну небезпеку для місцевого населення.

Більш за все від російських обстрілів потерпають припортові містечка у Одеській області, такі як: Чорноморськ, Південне, Белгород-Дністровський, які знаходяться в 30–80 км від Міжнародного аеропорту «Одеса», який може бути відправною точкою для такої гуманітарної місії. В статті пропонується застосування безпілотних літальних апаратів для доставки гуманітарних вантажів, а саме товарів медичного спрямування (ліків) та товарів першої необхідності у постраждалих районах півдня України.

Вибір Міжнародного аеропорту «Одеса» як базового хабу для організації перевезень гуманітарних вантажів за допомогою БПЛА, зумовлений його

стратегічним географічним розташуванням, що дозволяє забезпечити оперативне логістичне покриття найбільш постраждалих районів Півдня України, включаючи важкодоступні та деокуповані території. Використання безпілотних авіаційних систем є критично необхідним рішенням в умовах пошкодженої наземної інфраструктури та мінної небезпеки, оскільки дозволяє організувати доставку без прив'язки до стану автомобільних доріг. Впровадження БПЛА мінімізує ризики для життя екіпажів та суттєво скорочує час транспортування термінових медичних вантажів та товарів першої необхідності, порівняно з традиційною логістикою. Наявна інфраструктура аеропорту створює ідеальні умови для технічного обслуговування флоту та інтеграції авіадоставки у мультимодальні ланцюги з морськими та залізничними портами регіону. Це дозволить сформувати економічно ефективну та мобільну систему гуманітарного реагування, здатну функціонувати в умовах закритого повітряного простору для цивільної пілотованої авіації.

Рациональним рішенням зазначеної проблеми є створення багаторівневої логістичної системи з використанням безпілотних літальних апаратів, що поєднує переваги різних типів БПЛА відповідно до функціонального призначення маршрутів на трьох рівнях: магістральному, регіональному та локальному. Концепція багаторівневості дозволяє диференціювати логістичні потоки за дальністю, масою вантажу та оперативністю доставки, забезпечуючи оптимальне використання технічних ресурсів.

На магістральному рівні система передбачає застосування далекобійних безпілотних апаратів типу Dronamics Black Swan для перевезення значних обсягів гуманітарних вантажів між великими логістичними хабами (наприклад, між центральними складами в тилкових регіонах та базовим хабом у м. Одеса). Dronamics Black Swan [14] – довгобійний фіксованокрилий карго-дрон, оптимізований саме під авіаперевезення вантажів між великими хабами, з великою дальністю до 2500 км і вантажопідйомністю 350 кг, що робить його аналогом безпілотних вантажних літаків ближче до магістральної логістики. Використання таких БПЛА дозволяє суттєво скоротити час доставки критично важливих вантажів (медикаментів, медичного обладнання, генераторів, засобів енергозабезпечення), мінімізуючи залежність від наземних транспортних коридорів та зменшуючи ризики ураження колон автотранспорту.

Регіональний рівень логістичної системи базується на використанні VTOL-БПЛА (Pipistrel Nuuva V300), які поєднують значну вантажопідйомність із можливістю вертикального зльоту та посадки. Pipistrel Nuuva V300 [15] – гібридно-електричний VTOL для середніх і довгих маршрутів (до 300 км з середнім вантажем і потенційно значно більше при зменшенні навантаження), здатний перевозити до 460 кг вантажу та вертикально злітати/сідати без злітно-посадкової смуги з готовими площадками чи майданчиками для польових вузлів зв'язку чи лікарень. Це забезпечує гнучкість у виборі пунктів відправлення та прийому вантажів, що є критично важливим в умовах пошкоджених або недоступних аеродромів. На цьому рівні здійснюється доставка гуманітарних вантажів із базового хаба до районних центрів та опорних пунктів розподілу, включаючи лікарні, гуманітарні склади та пункти тимчасового розміщення населення.

Локальний рівень («остання миля») реалізується за допомогою важких мультикоптерів типу Volocopter Volo Drone, які характеризуються високою точністю доставки, можливістю зависання та посадки на обмежених майданчиках. Volocopter Volo Drone [16] – важкий мультикоптер-дрон, призначений для коротких польотів («останньої милі») з вантажами до 200 кг; має повністю електричну силову установку, що забезпечує маневреність та високий рівень безпеки. Це дозволяє забезпечувати безпосередню доставку гуманітарної допомоги до конкретних об'єктів: медичних закладів, пунктів видачі допомоги, житлових кварталів, що зазнали руйнувань. Висока інтенсивність рейсів та низька собівартість перевезення на цьому рівні роблять його найбільш ефективним з економічної точки зору.

Таким чином, багаторівнева логістична система з використанням БПЛА формує замкнений та взаємопов'язаний ланцюг гуманітарних перевезень, у якому кожен рівень виконує чітко визначену функцію. Такий підхід забезпечує підвищення пропускної здатності системи, скорочення часу доставки, зниження експлуатаційних витрат і, що є принципово важливим, мінімізацію ризиків для персоналу, що виконують гуманітарні перевезення.

Для постраждалих районів півдня України впровадження багаторівневої безпілотної логістичної системи є не лише технічно доцільним, а й стратегічно обґрунтованим рішенням, здатним суттєво підвищити стійкість гуманітарного забезпечення в умовах воєнного часу та закласти основу для післявоєнного відновлення регіону.

Порівняння технічних характеристик обраних безпілотної літальних апаратів представлено у таблиці 1.

Порівняльний аналіз технічних характеристик обраних БПЛА свідчить про доцільність їх використання в межах багаторівневої логістичної системи гуманітарних перевезень. Запропонована багаторівнева система ґрунтується на ієрархічному розподілі логістичних функцій між різними типами безпілотної літальних апаратів залежно від дальності маршруту, маси вантажу та оперативності доставки. Система складається з трьох взаємопов'язаних рівнів: магістрального, регіонального та локального. На магістральному рівні БПЛА може забезпечити транспортування гуманітарних вантажів між основними логістичними центрами, регіонального рівня, та сприяти доставці вантажів із регіональних хабів до районних пунктів. На локальному рівні БПЛА можуть забезпечувати безпосередню доставку вантажів до кінцевих отримувачів.

Для забезпечення стабільного та прогнозованого функціонування логістичної системи необхідно чітко визначити її технічні можливості, одним із ключових показників яких є пропускна здатність. Пропускна здатність системи гуманітарних перевезень із використанням безпілотної технологій визначається сукупністю технічних характеристик БПЛА, дальністю польоту, корисним навантаженням та кількістю можливих рейсів протягом доби. Для орієнтовної оцінки системи прийнято припущення, що на кожному маршруті працює один безпілотної літальний апарат, а кількість рейсів на день залежить від тривалості польоту, часу на завантаження/розвантаження та технічного обслуговування. Вихідні дані та результати розрахунків пропускної здатності системи представлено у таблиці 2.

Таблиця 1

Технічні характеристики обраних БПЛА [14–16]

Показник	PipistrelNuuva V300 (Словенія)	VolocopterVoloDrone (Німеччина)	Dronamics BlackSwan (Болгарія / ЄС)
Тип платформи	гібридно-електричний VTOL вантажний БПЛА	важкий eVTOL мультикоптер для вантажів	фіксовано крилий карго-дрон
Призначення	магістральні та регіональні перевезення вантажів	доставка «останньої милі» / важкий вантаж	магістральні перевезення вантажів airport-to-airport
Вантажо-підйомність	300–460 кг	до 200 кг	до 350 кг
Макс. злітна маса / MTOW	1700 кг	800 кг	орієнтована велика MTOW для далекого польоту
Дальність / радіус дії	300 км з 300 кг (до 2500 км з меншим навантаженням)	40 км	2500 км
Тривалість польоту / час	до 12 год	30 хв	залежить від маршруту і навантаження (велика дальність)
Крейсерська швидкість	165 км/год	80 км/год	200 км/год
Макс. швидкість	220 км/год	110 км/год	200 км/год
Висота польоту / потолок	до 6000 м	не зазначено чітко	6000 м / 20 000 фт
Силова установка	8 електродвигунів VTOL + 1 двигун внутр. згоряння	18 електродвигунів	поршневий двигун (Rotax або подібний)
Особливості	VTOL без смуги, великий вантажний відсік 3 м ³	повністю електричний; змінні батареї	великий радіус і вантажний простір (3.5 м ³)
Екологічні характеристики	нульові локальні викиди під час зльоту та посадки завдяки електричним двигунам	повністю екологічно чистий (Zero-emission) за рахунок 18 електродвигунів	до 60 % менше викидів CO ₂ порівняно з дизельними фургонами

Таблиця 2

Пропускна здатність багаторівневої логістичної системи [14, 15, 16]

Рівень системи	Вантажо-підйомність, кг	Дальність польоту, км	Кількість рейсів на добу	Добова пропускна здатність, кг/доба
Магістральний рівень (Dronamics Black Swan)	350	1500	1	350
Регіональний рівень (Pipistrel Nuuva V300)	300	300	2	600
Локальний рівень (Volocopter Volo Drone)	200	40	10	2000
Всього				2950

БПЛА типу VTOL (Pipistrel Nuuva V300) за умови корисного навантаження 300 кг та дальності польоту до 300 км, здатний виконувати в середньому два рейси на добу. Це зумовлено необхідністю повернення апарата на базу, заряджання або дозаправлення, а також обмеженнями робочого циклу. VTOL-платформи доцільно використовувати для регіональних термінових гуманітарних перевезень, зокрема доставки медикаментів, крові, вакцин та засобів першої необхідності у межах області або між сусідніми регіонами.

БПЛА типу Heavy-lift (Volocopter Volo Drone) призначені для інтенсивних коротких маршрутів з високою частотою рейсів [16]. За умови вантажопідйомності 200 кг та відстані до 40 км, один БПЛА може виконувати до 10 рейсів на день. Така висока інтенсивність пояснюється малою тривалістю польоту та швидким циклом завантаження/розвантаження. Цей тип апаратів є найбільш ефективним для внутрішньоміських та сільських маршрутів, доставки гуманітарної допомоги у важкодоступні населені пункти, а також для розподілу вантажів між локальними пунктами зберігання.

БПЛА типу Black Swan (Dronamics Black Swan) орієнтовані на виконання далекомагістральних перевезень між великими логістичними хабами. За вантажопідйомності 350 кг та дальності польоту до 1500 км, такий БПЛА, як правило, здатний виконати один рейс на добу, що пов'язано з тривалістю польоту та складністю підготовки. Black Swan доцільно використовувати для міжрегіональних та міжнародних гуманітарних перевезень, швидкої доставки критично важливих вантажів між центральними складами, гуманітарними хабами та зонами кризового реагування.

Багаторівнева логістична система здатна забезпечити перевезення до 3 тонн гуманітарних вантажів на добу при використанні по одному БПЛА кожного типу. Такий розподіл дозволить мінімізувати простій БПЛА, оптимізувати витрати пального та електроенергії, адаптувати систему до змін обстановки та обсягів гуманітарної допомоги. Поєднання різних типів БПЛА дозволяє оптимізувати використання ресурсів, зменшити час доставки гуманітарної допомоги та підвищити загальну пропускну здатність системи в умовах надзвичайних ситуацій.

Упровадження безпілотних літальних апаратів у логістичні процеси відкриває нові можливості для підвищення швидкості, гнучкості та ефективності доставки вантажів. Проте поряд із технічними перевагами важливим чинником залишається економічна доцільність такої системи. Саме тому ключовим етапом проектування багаторівневої логістичної системи з використанням БПЛА є розрахунок її собівартості.

Собівартість перевезення гуманітарних вантажів за допомогою БПЛА визначається як сукупність експлуатаційних витрат, що припадають на одиницю маси вантажу або на один рейс. Для спрощеного порівняльного аналізу в межах даного дослідження використано укрупнений підхід, який включає: витрати на енергоносії (паливо або електроенергію), технічне обслуговування, амортизацію БПЛА, операційні витрати (контроль, зв'язок, планування польоту).

Розрахунок здійснюється за формулою 1:

$$C_o = C_p * N, \quad (1)$$

де C_o – добові витрати, €/добу;

C_p – вартість одного рейсу, €/рейс;

N – кількість рейсів на добу.

Собівартість перевезення 1 кг вантажу визначається за формулою 2:

$$C_{\text{кг}} = \frac{C_o}{Q_o}, \quad (2)$$

де Q_o – добова маса перевезеного вантажу, кг.

Результати розрахунків зведено у таблицю 3.

Найнижча собівартість перевезень гуманітарних вантажів є на локальному рівні («остання миля») – 0,135 €/кг, що пояснюється високою частотою рейсів та використанням електричної силової установки. БПЛА типу Heavy-lift (Volocopter Volo Drone) ефективно застосовувати для дуже точної доставки «останньої милі» до лікарень, портів, складських майданчиків, постраждалих кварталів на короткий радіус, що компенсується високою точністю і можливістю зависання.

Таблиця 3

**Собівартість гуманітарних перевезень
у багаторівневій логістичній системі БПЛА**

Рівень системи	Вартість одного рейсу, €/рейс	Кількість рейсів на добу	Добові витрати, €/добу	Добова маса перевезеного вантажу, кг	Собівартість перевезення, €/кг
Магістральний рівень (Dronamics Black Swan)	800	1	800	350	2,290
Регіональний рівень (Pipistrel Nuuva V300)	300	2	600	300	1,000
Локальний рівень (Volocopter Volo Drone)	27	10	270	200	0,135
Всього			1670	2950	0,570

Найнижча собівартість перевезень гуманітарних вантажів є на локальному рівні («остання миля») – 0,135 €/кг, що пояснюється високою частотою рейсів та використанням електричної силової установки. БПЛА типу Heavy-lift (Volocopter Volo Drone) ефективно застосовувати для дуже точної доставки «останньої милі» до лікарень, портів, складських майданчиків, постраждалих кварталів на короткий радіус, що компенсується високою точністю і можливістю зависання.

Регіональний рівень (VTOL) забезпечує оптимальне співвідношення дальності та витрат, собівартість на цьому рівні становить 1,000 €/кг. VTOL (Pipistrel Nuuva V300) дуже ефективно застосовувати для регіональних гуманітарних перевезень (медикаменти, вакцини) від головного хаба (Міжнародного аеропорту «Одеса») до районних центрів (Чорноморськ, Південне, Белгород Дністровський).

Магістральні перевезення Black Swan (Dronamics Black Swan) мають найвищу собівартість – 2,290 €/кг, але вони є стратегічно необхідними для міжміських перевезень та швидкого переміщення вантажів гуманітарного характеру між великими хабами (Одеса – Київ, Одеса – Львів).

Розрахунок собівартості підтверджує економічну доцільність впровадження багаторівневої системи БПЛА для перевезень гуманітарних вантажів, оскільки поєднання різних типів безпілотників дозволяє суттєво знизити середні логістичні витрати при одночасному підвищенні оперативності доставки. Середня

собівартість багаторівневої логістичної системи становить 0,570 €/кг, що є конкурентним показником у порівнянні з традиційними видами транспорту в кризових умовах.

Побудована багаторівнева логістична система (рис. 1) дозволяє мінімізувати середню собівартість гуманітарних перевезень, перерозподіляючи обсяги вантажів між рівнями відповідно до їх функціонального призначення. Найбільш економічно ефективним є локальний рівень доставки, тоді як магістральний рівень виконує критично важливу функцію швидкого переміщення вантажів на великі відстані, незважаючи на вищу собівартість. Ця багаторівнева логістична система дозволяє оптимізувати швидкість і собівартість перевезень, розподіливши завантаження між трьома рівнями.

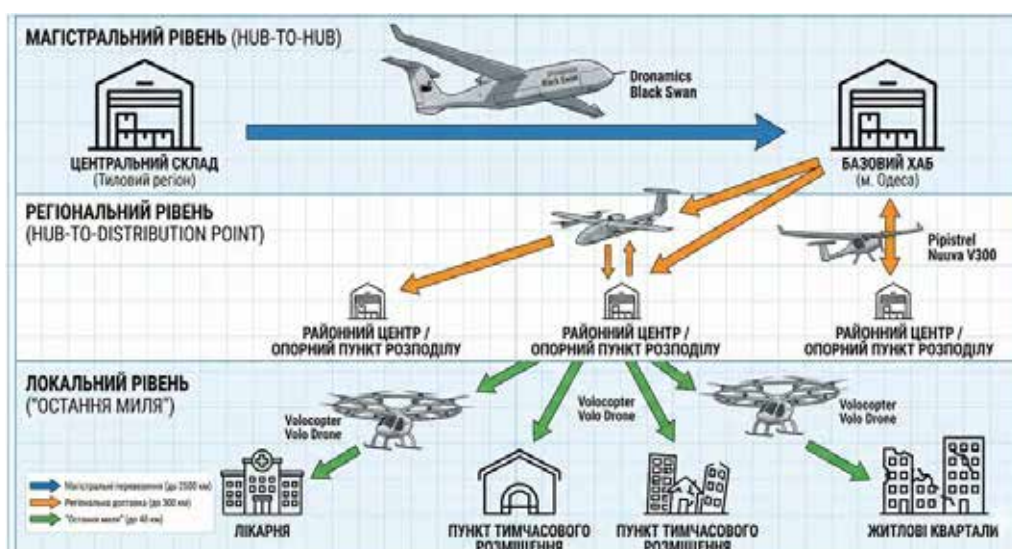


Рис. 1. Багаторівнева логістична система застосування безпілотних літальних апаратів для доставки гуманітарних вантажів

Запропонована багаторівнева логістична система БПЛА демонструє високу ефективність у забезпеченні гуманітарних перевезень за рахунок чіткого розподілу функцій між різними типами безпілотних літальних апаратів. Поділ логістики на регіональний, локальний («остання миля») та магістральний рівні дозволяє оптимізувати використання технічних ресурсів відповідно до дальності, маси вантажу та оперативності доставки.

Аналіз екологічного аспекту підтверджує, що запропонована багаторівнева система відповідає принципам «зеленої логістики». Найбільший екологічний ефект досягається на локальному рівні (Volocopter Volo Drone), де прямі викиди в атмосферу повністю відсутні. Використання гібридного VTOL (Pipistrel Nuuva V300) на регіональних маршрутах дозволяє мінімізувати шумове та хімічне забруднення в районах лікарень та гуманітарних центрів. Загалом, впровадження системи дозволяє знизити вуглецевий слід гуманітарної місії на 40–55 % порівняно з традиційною логістикою на базі двигуна внутрішнього згорання.

Висновки. На основі проведеного дослідження можна зробити такі висновки.

1. Встановлено, що руйнування наземної інфраструктури та висока мінна небезпека в Україні роблять традиційні логістичні методи малоефективними. Доведено, що використання БПЛА є критично необхідним інструментом для забезпечення швидкості та безпеки доставки вантажів першої необхідності у постраждалих районах.

2. Запропоновано та теоретично обґрунтовано модель багаторівневої системи, що включає магістральні дрони (Dronamics Black Swan), VTOL-БПЛА (Pipistrel Nuvva V300) та важкі мультикоптери (Volocopter Volo Drone). Такий підхід дозволяє диференціювати вантажопотоки залежно від дальності та терміновості.

3. Визначено, що сумарна добова пропускна здатність системи за умови використання по одній одиниці БПЛА кожного типу становить 2950 кг. Це підтверджує здатність системи забезпечувати значні обсяги гуманітарної допомоги в автономному режимі.

4. Доведено економічну ефективність моделі: середня собівартість перевезень становить 0,570 €/кг. Найбільш рентабельним визначено локальний рівень («остання миля») із показником 0,135 €/кг, що досягається завдяки високій інтенсивності рейсів та низьким витратам на електроенергію.

5. Обґрунтовано екологічну доцільність проекту: впровадження БПЛА дозволяє знизити викиди вуглекислого газу на 40-60 % порівняно з традиційним автотранспортом. Використання повністю електричних апаратів на локальному рівні забезпечує нульовий рівень шкідливих викидів у зоні безпосередньої доставки (лікарні, житлові квартали).

Також, можна зазначити, що використання БПЛА значно знижує ризики для персоналу, адже не вимагає прямої участі людей у зоні бойових дій або на небезпечних територіях. БПЛА здатні працювати в районах із пошкодженою інфраструктурою, що робить їх незамінними для доставки гуманітарних вантажів у складних умовах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гринів Н. Гуманітарна логістика як інструмент трансформації логістичних потоків в умовах воєнного часу. *Економіка та суспільство*. 2023. № 56. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-4>
2. Чуприна О., Колосок Е., Григоренко О. Гуманітарна логістика: особливості розвитку в сучасних реаліях. *Економіка та суспільство*. 2023. № 58. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-58-39>
3. Мироненко В. К. Основи гуманітарної логістики та транспортного обслуговування в надзвичайних ситуаціях. Інжиніринг криз та ризиків транспортних послуг : колективна монографія / за ред. В. М. Самсонкіна та І. В. Ніколаєнко. Київ : Талком, 2021. 312 с.
4. Apte, A. A. Humanitarian Logistics: A New Field of Research and Action. *Decision Sciences Journal of Innovative Education*. 2009. Vol. 7, № 4. P. 513–529.
5. Balcik, B., & Ak, D. Drones in Humanitarian Logistics: Opportunities, Challenges, and a Frame work for Implementation. *Journal of Operations Management*. 2021. Vol. 67, № 7. P. 945–963.

6. Scott, V., & Scott, V. Drones in humanitarian action: A review of the current landscape and future prospects. Geneva: Humanitarian UAV Network (UAViators), 2017. 65 p.
7. Tatham, P., & Balcik, B. The challenges of using drones in humanitarian supply chains. *Disasters*. 2019. Vol. 43, № 1. P. 100–121.
8. Плотніков О. В., Федоров В. М. Аналіз технічних характеристик безпілотних авіаційних комплексів, які можуть бути використані для доставки вантажів. 2020. № 6 (167). С. 27–34.
9. Пронь, С., Соловійова, *Науково-технічний журнал «Авіаційно-космічна техніка і технологія»*. О., Герасименко, І., та Борець, І. (2020). Моделювання транспортно-виробничого комплексу при вирощуванні сільськогосподарських культур з урахуванням авіаційної складової. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. № 2 (3 (104)), С. 30–39. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.198742>
10. Герасименко І. М., Пронь С. В., Висоцька І. І., Соловійова О. О. Застосування безпілотних літальних апаратів для моніторингу стану лісових масивів у післявоєнний період. *Наукові записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36 (75). № 1. Ч. 1. Видавництво “Helvetica”. С. 263–269. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/38>
11. Висоцька І., Валко А., Пронь С., Герасименко І., та Висоцький Ф. Визначення факторів безпеки повітряного транспорту, вразливих до актів незаконного втручання. *Східноєвропейський журнал корпоративних технологій*. 2025. № 2 (4 (134)). С. 54–67. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.328341>
12. Solomentsev O., Zaliskyi M., Kozhokhina O., Herasymenko T. “Efficiency of data processing for UAV operation system” 4th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD), Kiev, Ukraine, 2017, pp. 27–31, doi: 10.1109/APUAVD.2017.8308769.
13. Sushchenko R., Zapara Y., Saienko V., Kostyushko V., Lytvynenko L., Pron S. Urban transport, logistics, and tourism: Review of a cutting-edge socially-oriented approach to industrial development. *Acta Scientiarum Polonorum Administratio Locorum*. 2023. № 22 (1). P. 101–111. <https://doi.org/10.31648/aspal.8069>
14. The Black Swan. Dronamics. URL: <https://www.dronamics.com/theblackswan> (дата звернення: 16.01.2026).
15. Nuuva V300. Pipistrel. URL: <https://www.pipistrel-aircraft.com/air-cargo/> (дата звернення: 16.01.2026).
16. Volocopter. Volocopter. URL: <https://www.volocopter.com/en> (дата звернення: 16.01.2026).

REFERENCES

1. Hryniv, N. (2023). Humanitarian logistics as a tool for transforming logistics flows in wartime conditions [Humanitarna lohistyka yak instrument transformatsii lohistychnykh potokiv v umovakh

- voiennoho chasu]. *Economy and Society*, 56. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-4> [in Ukrainian].
2. Chupryna, O., Kolosok, E., Hryhorenko O. (2023). Humanitarian logistics: features of development in modern realities [Humanitarna lohistyka: osoblyvosti rozvytku v suchasnykh realiiakh]. *Economy and Society*, 58. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-58-39> [in Ukrainian]
 3. Myronenko, V. K. (2021). Fundamentals of humanitarian logistics and transport services in emergencies. *Engineering of crises and risks of transport services [Osnovy humanitarnoi lohistyky ta transportnoho obsluhovuvannia v nadzvychainykh sytuatsiiakh. Inzhynirynh kryz ta ryzykiv transportnykh posluh]*: collective monograph / edited by V. M. Samsonkin and I. V. Nikolayenko. Kyiv: Talkom. 312 p. [in Ukrainian].
 4. Apte, A. A. (2009). Humanitarian Logistics: A New Field of Research and Action [Humanitarna lohistyka: nova haluz doslidzhen ta dii]. *Decision Sciences Journal of Innovative Education*, 7 (4), 513–529.
 5. Balcik, B., & Ak, D. (2021). Drones in Humanitarian Logistics: Opportunities, Challenges, and a Frame work for Implementation [Humanitarna lohistyka: mozhlyvosti, vyklyky ta osnova dlia vprovadzhennia]. *Journal of Operations Management*, 67 (7), 945–963.
 6. Scott, V., & Scott, V. (2017). Drones in humanitarian action: A review of the current landscape and future prospects [Drony v humanitarnii diialnosti: ohliad suchasnoho stanu ta maibutni perspektyvy]. Geneva: Humanitarian UAV Network (UA Viators), 65 p.
 7. Tatham, P., & Balcik, B. (2019). The challenges of using drones in humanitarian supply chains [Problemy vykorystannia droniv u humanitarnykh lantsiuhakh postachannia]. *Disasters*, 43 (1), 100–121.
 8. Fedorov, V. M. (2020). Analysis of technical characteristics of unmanned aviation complexes that can be used for cargo delivery [Analiz tekhnichnykh kharakterystyk bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv, yaki mozhut buty vykorystani dlia dostavky vantazhiv]. *Scientific and technical journal "Aviation and space engineering and technology"*, 6 (167), 27–34. [in Ukrainian].
 9. Pron, S., Soloviova, O., Herasymenko, I., Borets, I. (2020). Modeling of the transport and production complex in the growing of agricultural crops, taking in to account the aviation component [Modeliuvannia transportno-vyrobnychoho kompleksu pry vyroshchuvanni silskohospodarskykh kultur z urakhuvanniam aviatsiinoi skladovoi]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2, (3 (104)), 30–39. Kharkiv, Ukraine. [in Ukrainian].
 10. Herasymenko, I.M., Pron, S.V., Vysotska, I.I., Soloviova, O.O. (2025). Application of unmanned aerial vehicles in monitoring the state of orostmassifs in the post-war period [Zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ dlia monitorynhu stanu lisovykh masyviv u pislivoiennyi period]. *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: "Technical Sciences"*, Vol. 36 (75), № 1, Part 1. Helvetica Publishing House, pp. 263–269 [in Ukrainian].

11. Vysotska, I., Valko, A., Pron, S., Herasymenko, I., Vysotskyi, F. (2025). Determination of air transport safety factor svulner abletoacts of un law ful interference [Vyznachennia faktoriv bezpeky povitrianoho transportu, vrazlyvykh do aktiv nezakonnoho vtruchannia]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (4 (134)), 54–67. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.328341>. [in Ukrainian].
12. Solomentsev, O., Zaliskyi, M., Kozhokhina, O., Herasymenko, T. (2017). Efficiency of data processing for UAV operation system [Efektyvnist obrobky danykh dlia systemy upravlinnia BPLA]. 4th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD), Kiev, Ukraine, pp. 27–31, doi: 10.1109/APUAVD.2017.8308769. [in Ukrainian].
13. Sushchenko R., Zapara Y., Saienko V., Kostiuszko, V., Lytvynenko, L., & Pron S. (2023). Urban transport, logistics, and tourism: Review of a cutting-edge socially-oriented approach to industrial development [Miskyi transport, lohistyka ta turyzm: ohliad peredovoho sotsialno oriientovanoho pidkhodu do promyslovoho rozvytku]. *Acta Scientiarum Polonorum Administratio Locorum*, 22 (1), 101–111. <https://doi.org/10.31648/aspal.8069> [in Ukrainian].
14. The Black Swan. Dronamics. URL: <https://www.dronamics.com/theblackswan> (date of application: 01/16/2026).
15. Nuuva V300. Pipistrel. URL: <https://www.pipistrel-aircraft.com/air-cargo/> (date of application: 01/16/2026).
16. Volocopter. Volocopter. URL: <https://www.volocopter.com/en> (date of application: 01/16/2026).

Дата першого надходження статті до видання: 23.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

ВПЛИВ ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНИХ ТА ВОДНЕВИХ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН НА ПРОЦЕДУРИ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ

О.Є. Луппо¹, Г.Ф. Аргунов², М.М. Богуненко³

¹канд. пед. наук, доцент кафедри аеронавігаційних систем,
Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна
ORCID ID: 0000-0001-9063-985X

²старший викладач кафедри аеронавігаційних систем,
Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна
ORCID ID: 0009-0009-1823-6461

³старший викладач кафедри аеронавігаційних систем,
Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна
ORCID ID: 0000-0002-9384-7870

Анотація

Вступ. У сучасних наукових дослідженнях дедалі більше уваги приділяється декарбонізації транспортних систем як необхідній умові сталого розвитку. Авіаційний транспорт, попри відносно невелику частку у глобальних викидах парникових газів, характеризується високими темпами зростання та складністю зниження екологічного впливу. У цьому контексті гібридні та водневі повітряні судна розглядаються як перспективний напрям розвитку авіації. Водночас їх вплив на організацію транспортних процесів і процедури управління повітряним рухом досі залишається недостатньо систематизованим. **Мета.** Метою статті є аналіз впливу використання гібридних та водневих повітряних суден на процедури управління повітряним рухом з урахуванням змін клімату, експлуатаційних особливостей і перспектив розвитку аеропортової інфраструктури. **Результати.** У роботі встановлено, що впровадження гібридних і водневих повітряних суден може призводити до змін інтенсивності руху та фактичної пропускної спроможності аеропортів унаслідок специфіки наземного обслуговування й заправки. Показано, що відмінності у льотно-технічних характеристиках і режимах роботи силових установок впливають на існуючі підходи до ешелонування, класифікацію повітряних суден за турбулентністю сліду та формування стандартних маршрутів вильоту і заходження на посадку. Виявлено необхідність адаптації аварійних процедур і алгоритмів реагування диспетчерських служб з урахуванням властивостей водню як енергоносія. **Висновки та перспективи подальших досліджень.** Показано, що інтеграція гібридних і водневих повітряних суден у транспортну систему потребує комплексного перегляду процедур управління повітряним рухом з урахуванням кліматичних, інфраструктурних та експлуатаційних чинників. Обґрунтовано доцільність подальших досліджень, спрямованих на кількісне моделювання впливу нових типів повітряних суден на ефективність функціонування системи управління повітряним рухом у змішаному повітряному русі.

Ключові слова: гібридні повітряні судна, водневі повітряні судна, управління повітряним рухом, пропускна спроможність, декарбонізація авіації.



**IMPACT OF THE USE OF HYBRID AND HYDROGEN AIRCRAFT
ON AIR TRAFFIC MANAGEMENT PROCEDURES**

O.Ye. Luppo¹, H.F. Arhunov², M.M. Bohunenko³

¹PhD in Education, Associate Professor of the Department Air Navigation Systems,
National University "Kyiv Aviation Institute" Kyiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0001-9063-985X

²Senior Lecturer of the Department Air Navigation Systems,
National University "Kyiv Aviation Institute" Kyiv, Ukraine
ORCID ID: 0009-0009-1823-6461

³Senior Lecturer of the Department Air Navigation Systems,
National University "Kyiv Aviation Institute" Kyiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-9384-7870

Summary

Introduction. Increasing environmental requirements and the growing impact of climate change necessitate the transformation of the aviation sector and the introduction of new types of aircraft. The use of hybrid and hydrogen propulsion systems is considered one of the most promising approaches to reducing the negative environmental impact of aviation. At the same time, the integration of such aircraft into the existing aviation system requires an assessment of their influence on the organisation and procedures of air traffic management. **Purpose.** The purpose of the article is to analyse the impact of the use of hybrid and hydrogen aircraft on air traffic management procedures, taking into account climate change, operational characteristics, and the prospects for the development of airport infrastructure. **Results.** It has been established that the introduction of hybrid and hydrogen aircraft may lead to changes in traffic intensity and the effective capacity of airports due to the specific features of ground handling and refuelling processes. It is shown that differences in flight performance characteristics and propulsion system operating modes affect existing approaches to aircraft separation, wake turbulence classification, and the design of standard departure and arrival routes. The need to adapt emergency procedures and response algorithms of air traffic services, taking into account the properties of hydrogen as an energy carrier, has been identified. **Conclusions.** The article demonstrates that the integration of hybrid and hydrogen aircraft into the transport system requires a comprehensive revision of air traffic management procedures, considering climatic, infrastructural, and operational factors. The expediency of further research aimed at quantitative modelling of the impact of new aircraft types on the efficiency of air traffic management systems under mixed traffic conditions is substantiated.

Key words: aviation transport, hybrid aircraft, hydrogen technologies, air traffic management, capacity, transport decarbonisation.

Вступ. Зростання екологічних вимог і вплив зміни клімату зумовлюють необхідність трансформації авіаційного транспорту та впровадження нових типів повітряних суден (ПС). Використання гібридних і водневих силових установок розглядається як один із перспективних напрямів зниження негативного впливу авіації на довкілля. Водночас інтеграція таких ПС у чинну авіаційну систему потребує оцінювання їх впливу на організацію та процедури управління повітряним рухом (УПР).

Постановка проблеми. З початку XXI століття питання зміни клімату стало одним із ключових викликів для глобального економічного та транспортного розвитку. Парникові гази, що акумулюються в атмосфері, спричиняють підвищення середньорічних температур, зміну метеорологічних режимів та екстремальні явища, які вже впливають на життєдіяльність людських спільнот. Сектор цивільної авіації, незважаючи на відносно невелику частку у загальних глобальних викидах парникових газів (за оцінками близько 2–3 %), має значний вплив на атмосферу завдяки викидам CO₂, оксидів азоту (NO_x) та утворенню авіаційних конденсаційних слідів (контрейлів), що призводить до змін радіаційного балансу атмосфери в тропосфері та нижній стратосфері [1]. Це, зокрема, підтверджено при аналізі радіаційних ефектів авіаційних контрейлів, що спричиняють як локальне, так і глобальне потепління за рахунок тривалого впливу на енергетичний баланс атмосфери [2]. Хоча авіація становить відносно невелику частку світових викидів, вона є одним із найскладніших секторів для декарбонізації. Якщо не вжити жодних заходів, очікується, що авіаційні викиди зростуть ще більше, виходячи з прогнозу постійно зростаючого попиту на авіаперевезення. Очікується, що світовий попит на авіаперевезення щонайменше подвоїться до 2050 року.

У відповідь на екологічні виклики міжнародні організації та уряди приймають різноманітні ініціативи з декарбонізації авіаційного сектору. У 2021 році Європейський Союз (ЄС) прийняв План дій щодо нульового забруднення [3], який визначив бачення щодо скорочення забруднення повітря, води та ґрунту до рівнів, які більше не вважатимуться шкідливими для здоров'я та природних екосистем до 2050 року.

Серед таких заходів – глобальні схеми екологічних обліків і торгівлі викидами, стандартизація використання альтернативних видів палива, включно зі сталим авіаційним паливом (Sustainable Aviation Fuels – SAF), як сертифікованою альтернативою авіаційному гасу, що забезпечує зниження викидів CO₂ без модифікації повітряних суден (ПС) [4; 5].

Водночас практика показує, що ці механізми мають обмежену ефективність без суттєвого структурного оновлення авіаційних технологій (наприклад, переходу до електричних або водневих джерел енергії) [6]. Важливо також зазначити, що асоціації експертів і екологічних груп критикують деякі чинні підходи як недостатньо амбітні, наголошуючи на потребі більш радикальних технологічних рішень для досягнення кліматичних цілей.

Серед перспективних напрямів декарбонізації авіаційного транспорту значна увага приділяється водневим технологіям, що передбачають використання водню як альтернативного палива або джерела енергії в паливних елементах чи змінених газотурбінних установках. За оцінками EUROCONTROL та Альянсу за авіацію з нульовим рівнем викидів (Alliance for Zero-Emission Aviation – AZEA) [7], інтеграція водневих і електричних ПС може суттєво знизити викиди CO₂ на регіональних маршрутах і забезпечити до 36–68 % внутрішніх перельотів у ЄС з нульовими викидами до 2050 року при широкому впровадженні відповідної інфраструктури та технологій. Проте технічні та інфраструктурні складнощі можуть відтермінувати комерційну реалізацію водневих ПС, як мінімум до 2040 року.

Аналіз сучасних досліджень та програм розвитку водневих літаків. Сучасні дослідження у сфері декарбонізації авіаційного транспорту здійснюються

в межах комплексних міжнародних програм, спрямованих на трансформацію авіаційної галузі у довгостроковій перспективі. На рівні Європейського Союзу ключову роль у формуванні науково-дослідного порядку денного відіграє Спільне підприємство Clean Aviation, яке функціонує в рамках програми Horizon Europe та об'єднує зусилля промисловості, наукових установ і регуляторних органів. Метою цих ініціатив є поетапний перехід від традиційної авіації, що базується на викопному паливі, до кліматично нейтральної авіаційної системи, що передбачає впровадження нових енергетичних носіїв, зміну архітектури ПС, а також адаптацію операційних процедур і інфраструктури.

Узагальнену логіку поетапного переходу авіаційного сектору до кліматично нейтральної авіації в межах програми Horizon Europe наведено на рис. 1.



Рис. 1. Поетапний перехід авіаційних технологій від традиційної авіації на викопному паливі до кліматично нейтральної авіаційної системи (Horizon Europe, 2020–2050)

Джерело: адаптовано за матеріалами Horizon Europe та Clean Aviation Joint Undertaking.

Як показано на рис. 1, розвиток авіаційних технологій розглядається як багатоступеневий процес, у межах якого водневі рішення займають ключове місце на етапі переходу до кліматично нейтральної авіації, насамперед у сегментах регіональних та середньомагістральних перевезень. При цьому наголошується, що декарбонізація авіації не обмежується лише впровадженням нових типів ПС, а потребує системних змін у наземній інфраструктурі, нормативно-правовому забезпеченні та організації повітряного руху (ОрПР).

Аналіз наукових публікацій і галузевих звітів свідчить, що водневі технології в авіації розглядаються у двох основних напрямках: використання водню як палива для газотурбінних двигунів та застосування водню як джерела енергії для паливних елементів з подальшим електричним приводом. Обидва підходи активно досліджуються в межах програм Clean Aviation, а також у рамках демонстраційних проєктів промислових компаній та стартапів. Разом із тим у більшості джерел підкреслюється, що масове впровадження таких ПС обмежується не лише технічними викликами, але й необхідністю створення відповідної аеропортової та операційної екосистеми.

Український науковий контекст також демонструє розуміння важливості водневих технологій з точки зору загального енергетичного переходу. Зокрема громадська спілка «Енергетична асоціація «Українська воднева рада» займається розвитком зеленої водневої енергетики як невід'ємної частини виробництва та постачання альтернативних джерел енергії, а також поширенням водневих технологій у різних секторах промисловості та бізнесу з метою підвищення їхньої енергоефективності [8]. Так, міжнародні та вітчизняні дослідження підкреслюють потенціал водню в енергетичній системі України як елемента стратегії переходу до низьковуглецевої економіки, хоча прямої участі у світових авіаційних водневих проєктах Україна наразі не має.

Окремий блок досліджень присвячений регуляторним та сертифікаційним аспектам. У звітах Європейського агентства з авіаційної безпеки (EASA) та Міжнародної організації цивільної авіації (ICAO) наголошується, що для водневих ПС необхідно розробити нові або адаптовані стандарти безпеки, які охоплюватимуть питання криогенних систем, електричних силових установок великої потужності, а також інтеграції таких ПС у чинні системи УПР. Відсутність усталених стандартів на даному етапі розглядається як один із ключових чинників невизначеності щодо строків широкого впровадження водневих літаків у комерційну експлуатацію.

Таким чином, аналіз сучасних досліджень показує, що водневі технології розглядаються як перспективний напрям розвитку авіації, однак їх практична реалізація неминуче супроводжуватиметься змінами в організації повітряного руху, структурі аеропортів та процедурному забезпеченні польотів. Це зумовлює необхідність комплексного аналізу впливу водневих та гібридних ПС на процедури УПР, що й визначає подальшу логіку дослідження.

Метою цієї роботи є всебічний аналіз того, як використання гібридних та водневих ПС вплине на процедури УПР, включно з адаптацією існуючих підходів до ешелонування, профілів польоту, пропускної спроможності аеропортів та організації аварійних процедур. Ця проблема є ключовою для забезпечення безпечної й ефективної інтеграції нових технологій у майбутню авіаційну систему. Для досягнення поставленої мети у роботі передбачено вирішення таких завдань:

- проаналізувати сучасний стан і перспективи розвитку гібридних та водневих ПС з урахуванням міжнародних програм декарбонізації авіаційного транспорту;
- дослідити взаємний вплив авіаційної діяльності та зміни клімату, зокрема вплив кліматичних факторів на умови експлуатації ПС і організацію повітряного руху;

- оцінити вплив використання гібридних та водневих ПС на аеропортову інфраструктуру, інтенсивність повітряного руху та пропускну спроможність;
- проаналізувати можливі зміни процедур УПР, включно з ешелонуванням, профілями польоту та аварійними процедурами, зумовлені впровадженням нових типів ПС.

Виклад основного матеріалу. Систематизація існуючих концептів дозволяє виділити два базові архетипи водневих ПС, кожен із яких має специфічні експлуатаційні характеристики і виклики.

Повітряні судна з прямим згорянням водню

Цей підхід передбачає модифікацію газотурбінних двигунів для спалювання водню або створення гібридних схем із традиційними турбовентиляторними елементами. Концепти такого типу орієнтовані на регіональні та середньомігстральні місії з пасажиромісткістю від ~100 до 150 осіб і дальністю від $\approx 1\ 000$ до $\approx 1\ 400$ морських миль залежно від архітектури. Переваги: відносно менші переробки аеродинамічних концепцій у порівнянні з повністю електричними рішеннями; потенційно краща продуктивність на крейсерських висотах порівняно з деякими паливно-електричними схемами. Виклики: криогенне зберігання LH_2 , система подачі та впорскування паливного газу, контроль NO_x при згорянні, питання безпеки і матеріалів баків. (Цей тип представлений у концептах ZEROe [9] і численних аналітичних документах Clean Aviation) [10].

Повітряні судна з електроприводом на паливних елементах

У цій архітектурі водень є лише енергетичним носієм для паливних елементів, які генерують електроенергію для електричних двигунів. Такий підхід вже реалізований у демонстраторах (HY4 [11], ZeroAvia [12]) і підходить для регіональних літаків малої місткості. Переваги: відсутність прямого згоряння на борту (нижчі емісії NO_x), можливість гнучкого розміщення електричних підсистем. Виклики: енергоємність стеків паливних елементів, маса енергетичного обладнання (стек, інвертори, акумуляторні буфери), низька швидкість зміни тяги при короткочасних пікових навантаженнях, потреба у високовольтних системах і охолодженні. Демонстраційні польоти показали життєздатність концепту, але також вказали на необхідність подальшої оптимізації вагово-енергетичних параметрів.

Вплив зміни клімату на авіаційну діяльність та процедури УПР

Зміна клімату впливає на авіаційну систему не лише через необхідність скорочення викидів парникових газів, але й безпосередньо через погіршення метеорологічних та експлуатаційних умов виконання польотів. Згідно з European Aviation Environmental Report 2025, підготовленим EASA спільно з Європейською комісією, Європейським агентством з навколишнього середовища та EUROCONTROL, підвищення середніх і екстремальних температур, зміна режимів опадів, зростання частоти штормів та теплових хвиль уже створюють відчутні ризики для безпеки та регулярності авіаційних перевезень [13].

Підвищення температури повітря призводить до зменшення його щільності, що безпосередньо впливає на злітно-посадкові характеристики ПС. У таких умовах знижуються експлуатаційні запаси безпеки при зльоті та посадці, зростає потреба в обмеженні корисного навантаження або використанні довших злітно-посадкових смуг (ЗПС). За даними EASA, ці ефекти особливо критичні для аеропортів,

розташованих на великій висоті над рівнем моря або з обмеженою довжиною ЗПС, що може призводити до зменшення їх фактичної пропускної спроможності в періоди високих температур [13].

Зміна режимів опадів і зростання частоти інтенсивних дощів та снігопадів підвищують ризик забруднення, підтоплення та деградації ЗПС, а також збільшують імовірність викочування ПС за межі ЗПС. У звіті EASA наголошується, що такі явища можуть спричинити тимчасове закриття аеродромів або окремих елементів аеродромної інфраструктури, що, у свою чергу, призводить до масових затримок, відхилень маршрутів і збільшення навантаження на органи УПР.

Окрему групу ризиків становить зростання частоти сильних штормів, шквальних вітрів і грозової активності. Подібні метеорологічні явища збільшують імовірність пошкодження ПС, наземного обладнання та аеронавігаційних засобів, а також знижують стабільність процедур заходження на посадку. Крім того, зміна вітрових полів, зокрема струменевих течій та приземних вітрів, впливає на вибір робочої ЗПС, інтервали ешелонування та ефективну пропускну спроможність повітряного простору [13; 14].

Зростання частоти явищ турбулентності ясного неба, особливо на крейсерських ешелонах, також розглядається як один із наслідків кліматичних змін. За оцінками європейських експертів, це ускладнює підтримання стабільних профілів польоту, підвищує потребу в зміні ешелонів та маршрутизації в реальному часі і, відповідно, збільшує операційну складність роботи диспетчерських служб.

Таким чином, зміна клімату виступає не лише довгостроковим екологічним викликом для авіації, але й чинником, що безпосередньо впливає на безпеку польотів, регулярність авіаційних перевезень та ефективність процедур УПР. У цьому контексті впровадження гібридних та водневих ПС має розглядатися з урахуванням зростаючої метеорологічної мінливості та необхідності підвищення адаптивності систем УПР, оскільки кліматичні фактори можуть посилювати експлуатаційні обмеження нових типів ПС.

На відміну від більшості наявних досліджень, у цій роботі основна увага приділяється впливу нових типів ПС саме на процедури УПР.

Організація та управління повітряним рухом

Перехід авіаційної галузі до використання гібридних та водневих ПС відкриває перспективи зниження викидів і підвищення екологічної ефективності перевезень. Водночас впровадження таких літальних апаратів ставить перед системою УПР і аеропортовою інфраструктурою ряд нових завдань. На відміну від традиційних реактивних і турбогвинтових ПС, апарати з альтернативними силовими установками мають інші аеродинамічні характеристики, енергетичні профілі, вимоги до наземних операцій і специфічні ризики, що прямо впливатиме на діяльність диспетчерських служб.

У контексті майбутньої інтеграції таких ПС до регіональної та міжнародної мережі доцільно виокремити ключові напрями, у межах яких експлуатація гібридних і водневих літаків може змінити усталені процедури УПР:

- Вимоги до аеропортової інфраструктури та руху на землі.
- Вплив на інтенсивність операцій і загальну пропускну спроможність.

- Можливе коригування принципів ешелонування із врахуванням особливостей турбулентності сліду.
- Відмінності у профілях набору висоти, горизонтального польоту та зниження.
- Специфіка аварійних та нестандартних процедур.

Окремою, але невід’ємною складовою є підготовка персоналу – підготовка й перепідготовка диспетчерського та аеродромного складу має розглядатися як наступний крок після формалізації технічних стандартів і процедур; навчання саме не є первинним джерелом технічних обмежень, проте є критичною умовою безпечної інтеграції нових технологій.

Аеропортова інфраструктура та наземне обслуговування

Впровадження водневих ПС вимагатиме цілеспрямованої реконфігурації аеропортових ресурсів: виділення спеціальних стоянок і зон заправки LH₂, встановлення систем визначення витоків, посилення протипожежних заходів і оновлення процедур наземного обслуговування. Через наявність криогенних баків і чутливих магістралей деякі елементи конструкції виявляються несумісними з традиційними де-айсинговими реагентами; це вимагає оновлення технології обробки льоду (обмеження температури нанесення, локальні методи очищення, виділені майданчики для обробки) і, як наслідок, призводить до подовження часу обслуговування та ускладнення логістики перону.

Інтенсивність руху та пропускна спроможність

Через збільшену тривалість наземних операцій і можливе зниження кількості доступних стоянок загальна інтенсивність польотів на початковому етапі впровадження може скоротитись. Конструктивні особливості водневих ПС (включно з необхідністю криобаків та ізоляції) часто супроводжуються зменшеною пасажиромісткістю, тож для збереження пасажиропотоку авіакомпаніям доведеться збільшувати кількість рейсів або парк ПС. Це підвищує щільність руху, навантаження на стоянки та потребу в слотах, що у сумі погіршує пропускну спроможність аеропорту і системи УПР; додаткові операційні затримки посилюються в зимовий період через адаптовані de-icing процедури.

Ешелонування за категоріями турбулентності сліду

Класифікація ПС за турбулентністю сліду (Wake Turbulence Categories – WTC) (ICAO: Light/Medium/Heavy/Super) традиційно спирається на максимальну злітну масу (*Maximum Take-Off Weight – MTOW*) [15; 16], однак інтенсивність вихрового сліду визначається широким набором параметрів – розмах крил, аеродинамікою, конфігурацією тощо. Саме це послужило підґрунтям для RECAT-EU (шестикатегорійна модель) [17]. Хоча масо-габаритні параметри водневих ПС можуть співпадати з існуючими типами, змінена геометрія фюзеляжу й крила, а також нетипові режими тяги здатні модифікувати вагову поведінку ПС; тому можливі перегляди категоризації або введення підкатегорій, що матиме прямі наслідки для інтервалів ешелонування і роботи диспетчерів у змішаному русі.

Профілі зльоту, набирання висоти та зниження

Демонстраційні проекти (H2Fly [11], ZeroAvia [12],) і технічні оцінки (Airbus ZEROe [9]) вказують на неоднорідність льотно-технічних характеристик водневих ПС залежно від архітектури силової установки: паливні елементи, як правило,

характеризуються меншою швидкодинамікою тяги, що знижує ROC і уповільнює реакцію при маневрах; водневі турбореактивні установки можуть демонструвати підвищену ефективність на крейсерських висотах [18; 19]. У підсумку очікуються зміни у стандартних маршрутах прибуття та вильоту, процедурах постійного зниження і процедурах стабілізованого заходу, а також потенційна необхідність формування окремих швидкісних потоків.

Аварійні процедури та реагування

Властивості водню (легкість, криогенний стан, малопомітне полум'я) трансформують класичні аварійні сценарії. Наявні методичні матеріали EUROCONTROL/SKYbrary [20] слугують корисною базою для формування алгоритмів реагування, проте вимагають доповнення спеціалізованими процедурами: алгоритмами дій при криогенних витоках, оновленими протоколами взаємодії з аварійними службами, процедурами обробки підозри на деградацію паливних елементів, а також критеріями пріоритизації в повітряному просторі під час одночасної присутності традиційних і водневих ПС.

Український контекст

Масштабні руйнування авіаційної інфраструктури України внаслідок бойових дій створюють унікальну можливість відмовитися від простого копіювання застарілих рішень на користь моделі “Build Back Better” (відбудувати краще, ніж було). Це дозволяє інтегрувати вимоги до водневої авіації ще на етапі проектування нових генеральних планів аеропортів.

Для розвитку таких стратегічних вузлів, як, наприклад, аеропорти різних класів та функціонального призначення – «Бориспіль», «Львів» чи «Антонов», – необхідно передбачати технічні коридори для вакуумно-ізольованих трубопроводів і спеціалізовані зони для криогенного зберігання рідкого водню. Це дозволить у майбутньому уникнути критичних затримок під час заправки та обслуговування ПС, які є суттєвим викликом для пропускнуої спроможності.

Україна має потужний потенціал відновлюваної енергетики, що дозволяє реалізувати концепцію виробництва «зеленого» водню безпосередньо поблизу аеропортових зон. Такий підхід вирішує складну проблему логістики палива та дозволяє аеропортам стати не просто транспортними вузлами, а енергетичними хабами, що відповідає цілям програми Clean Aviation. Враховуючи специфіку українських зим, особливу увагу слід приділити розробці нових методів протиобледеніння (de-icing) для водневих ПС. Оскільки традиційні реагенти можуть бути несумісними з чутливими елементами криогенних конструкцій, необхідно проектувати спеціалізовані майданчики з локальним підігрівом або інноваційними методами очищення, щоб мінімізувати операційні затримки.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У статті проаналізовано сучасні напрями декарбонізації авіаційного транспорту з акцентом на розвиток гібридних і водневих повітряних суден та їх вплив на організацію й управління повітряним рухом. Показано, що, попри відносно невелику частку авіації у глобальних викидах парникових газів, саме цей сектор є одним із найбільш складних для досягнення кліматичної нейтральності.

Аналіз міжнародних програм і наукових досліджень засвідчив, що водневі технології розглядаються як один із ключових інструментів довгострокової

декарбонізації, насамперед у сегменті регіональних і середньоміжконтинентальних перевезень. Водночас масове впровадження водневих ПС стримується технічними, інфраструктурними та регуляторними обмеженнями, а також потребою у створенні нових стандартів безпеки й сертифікації.

Встановлено, що зміна клімату вже сьогодні безпосередньо впливає на умови експлуатації ПС, пропускну спроможність аеропортів і ефективність процедур УПР. Підвищення температур, зростання частоти екстремальних метеорологічних явищ і збільшення турбулентності повітряних мас ускладнюють підтримання стабільних профілів польоту та підвищують навантаження на диспетчерські служби.

Показано, що інтеграція гібридних і водневих ПС вимагатиме адаптації процедур ешелонування, маршрутів польоту та заходження на посадку, аварійного реагування та наземного обслуговування, а також може впливати на інтенсивність руху і загальну пропускну спроможність аеропортів. У зв'язку з цим подальші дослідження доцільно спрямувати на кількісне моделювання впливу нових типів ПС на роботу системи УПР у змішаному повітряному русі.

Окремо слід відзначити, що післявоєнне відновлення авіаційної інфраструктури України створює можливість інтеграції вимог водневої авіації та адаптації процедур УПР ще на етапі стратегічного планування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Prashanth P., Elmourad J., Grobler C. [et al.]. Near-zero environmental impact aircraft. *Sustainable Energy & Fuels*. 2024. Vol. 8. No 20. P. 4772–4782. doi: 10.1039/D4SE00419A
2. Ortiz I., Dimitropoulou E., de Buyl P. [et al.]. Satellite-Based Quantification of Contrail Radiative Forcing over Europe: A Two-Week Analysis of Aviation-Induced Climate Effects. *arXiv*. 2024. doi: 10.48550/arXiv.2409.10166
3. European Commission. Zero Pollution Action Plan: Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil. Brussels, 2021. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0400> (дата звернення: 17.02.2026).
4. European Union Aviation Safety Agency. Sustainable aviation fuels: Technical, environmental and operational perspectives. Cologne: EASA, 2021. 56 p.
5. International Civil Aviation Organization. Sustainable Aviation Fuels Guide. Montreal: ICAO, 2018. 104 p.
6. НТЦ «Псіхея». Авіаційний сектор на шляху до декарбонізації: виклики та можливості до 2025 року. 2025. URL: <https://oilreview.kiev.ua/2025/03/19/aviacijnij-sektor-na-shlyaxu-do-dekarbonizaci%D1%97-vikliki-ta-mozhливosti-do-2025-roku/> (дата звернення: 17.02.2026).
7. EUROCONTROL. The vision for zero-emission aviation in Europe. 2024. URL: <https://www.eurocontrol.int/article/vision-zero-emission-aviation-europe> (дата звернення: 17.02.2026).
8. Hydrogen Ukraine Association. Hydrogen.ua – аналітика та огляди щодо виробництва та використання водню. URL: <https://hydrogen.ua/en/about-association/achievements> (дата звернення: 17.02.2026).

9. Airbus. Airbus reveals new zero-emission concept aircraft (ZEROe). 2020. URL: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2020-09-airbus-reveals-new-zero-emission-concept-aircraft> (дата звернення: 17.02.2026).
10. Clean Aviation. Towards Disruptive Technologies for New Generation Aircraft by 2035. 2024. URL: <https://clean-aviation.eu/sites/default/files/2024-09/2024-Clean-Aviation-SRIA.pdf> (дата звернення: 17.02.2026).
11. H2FLY. World's first piloted flight of liquid-hydrogen powered electric aircraft. 2023. URL: <https://www.h2fly.de/2023/09/07/h2fly-and-partners-complete-worlds-first-piloted-flight-of-liquid-hydrogen-powered-electric-aircraft> (дата звернення: 17.02.2026).
12. ZeroAvia. Fuel cell system replicates full flight profile in ground test. 2025. URL: <https://www.h2-tech.com/news/2025/09-2025/zeroavia-certification-intent-fuel-cell-system-replicates-full-flight-profile-in-ground-test> (дата звернення: 17.02.2026).
13. European Union Aviation Safety Agency. European Aviation Environmental Report 2025. 2025. URL: <https://www.eurocontrol.int/publication/european-aviation-environmental-report-2025> (дата звернення: 17.02.2026).
14. European Environment Agency. Environment and climate impacts of aviation continue growing. URL: <https://www.eea.europa.eu/highlights/environment-and-climate-impacts-of> (дата звернення: 17.02.2026).
15. International Civil Aviation Organization. Doc 4444: Procedures for Air Navigation Services – Air Traffic Management. 16th ed. Montreal: ICAO, 2016.
16. ICAO Wake Turbulence Category. URL: <https://skybrary.aero/articles/icao-wake-turbulence-category> (дата звернення: 17.02.2026).
17. EUROCONTROL. European Wake Turbulence Categorisation and Separation Minima on Approach and Departure (RECAT-EU). Edition 2.0. Brussels: EUROCONTROL, 2024.
18. Huang X., Li J., Wang Y. Proton Exchange Membrane Fuel Cells for Aircraft Applications: A Comprehensive Review of Key Challenges and Development Trends. *Aerospace*. 2025. Vol. 6. No 4. Article 116. doi: 10.3390/hydrogen6040116
19. McKinsey & Company; Clean Sky 2 Joint Undertaking. Hydrogen-powered Aviation: A Fact-Based Study of Hydrogen Technology, Economics, and Climate Impact by 2050. 2020. URL: <https://www.h2knowledgecentre.com/content/researchpaper1126> (дата звернення: 20.12.2025).
20. EUROCONTROL. Guidelines for Dealing with Unusual/Emergency Situations in ATC. URL: <https://skybrary.aero/articles/guidelines-dealing-unusualemergency-situations-atc> (дата звернення: 17.02.2026).

REFERENCES

1. Prashanth, P., Elmourad, J., Grobler, C., et al. (2024). Near-zero environmental impact aircraft. *Sustainable Energy & Fuels*, 8 (20), 4772–4782. doi: 10.1039/D4SE00419A

2. Ortiz, I., Dimitropoulou, E., de Buyl, P., et al. (2024). Satellite-based quantification of contrail radiative forcing over Europe: A two-week analysis of aviation-induced climate effects. *arXiv*. doi: 10.48550/arXiv.2409.10166
3. European Commission. (2021). *Zero pollution action plan: Towards zero pollution for air, water and soil*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0400>.
4. European Union Aviation Safety Agency. (2021). *Sustainable aviation fuels: Technical, environmental and operational perspectives*. EASA.
5. International Civil Aviation Organization. (2018). *Sustainable aviation fuels guide*. ICAO.
6. Psikheia Research Center. (2025). Aviatsiyni sektor na shliakhu do dekarbonizatsii: vyklyky ta mozhlyvosti do 2025 roku [The aviation sector on the path to decarbonization: Challenges and opportunities until 2025]. <https://oilreview.kiev.ua/2025/03/19/aviacijnij-sektor-nashlyaxu-do-dekarbonizaci%D1%97-vikliki-ta-mozhlyvosti-do-2025-roku/> [in Ukrainian].
7. EUROCONTROL. (2024). *The vision for zero-emission aviation in Europe*. <https://www.eurocontrol.int/article/vision-zero-emission-aviation-europe>.
8. Hydrogen Ukraine Association. (n.d.). Hydrogen.ua – analytics and reports on hydrogen production and use. <https://hydrogen.ua/en/about-association/achievements>.
9. Airbus. (2020). Airbus reveals new zero-emission concept aircraft (ZEROe). <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2020-09-airbus-reveals-new-zero-emission-concept-aircraft>.
10. Clean Aviation. (2024). Towards disruptive technologies for new generation aircraft by 2035. <https://clean-aviation.eu/sites/default/files/2024-09/2024-Clean-Aviation-SRIA.pdf>.
11. H2FLY. (2023). World's first piloted flight of a liquid-hydrogen-powered electric aircraft. <https://www.h2fly.de/2023/09/07/h2fly-and-partners-complete-worlds-first-piloted-flight-of-liquid-hydrogen-powered-electric-aircraft>.
12. ZeroAvia. (2025). Fuel cell system replicates full flight profile in ground test. <https://www.h2-tech.com/news/2025/09-2025/zeroavia-certification-intent-fuel-cell-system-replicates-full-flight-profile-in-ground-test>.
13. European Union Aviation Safety Agency. (2025). European aviation environmental report 2025. <https://www.eurocontrol.int/publication/european-aviation-environmental-report-2025>.
14. European Environment Agency. (n.d.). Environment and climate impacts of aviation continue growing. <https://www.eea.europa.eu/highlights/environment-and-climate-impacts-of>.
15. International Civil Aviation Organization. (2016). *Doc 4444: Procedures for air navigation services – Air traffic management* (16th ed.). ICAO.
16. Skybrary. (n.d.). ICAO wake turbulence category. <https://skybrary.aero/articles/icao-wake-turbulence-category>.

17. EUROCONTROL. (2024). *European wake turbulence categorisation and separation minima on approach and departure (RECAT-EU)* (Edition 2.0). EUROCONTROL.
18. Huang, X., Li, J., & Wang, Y. (2025). Proton exchange membrane fuel cells for aircraft applications: A comprehensive review of key challenges and development trends. *Aerospace*, 6 (4), Article 116. doi: 10.3390/hydrogen6040116
19. McKinsey & Company, & Clean Sky 2 Joint Undertaking. (2020). *Hydrogen-powered aviation: A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050*. <https://www.h2knowledgecentre.com/content/researchpaper1126>.
20. EUROCONTROL. (n.d.). Guidelines for dealing with unusual/emergency situations in ATC. <https://skybrary.aero/articles/guidelines-dealing-unusualemergency-situations-atc>.

Дата першого надходження статті до видання: 29.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ СТАЛІ МАГІСТРАЛЬНИХ ТА ПРОМИСЛОВИХ ТРУБОПРОВІДІВ НА ЯКІСТЬ ЗВАРЮВАННЯ

Р.Т. Мартинюк¹, О.Т. Чернова²

¹к.т.н, доцент кафедри транспортування та зберігання енергоносіїв,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-
Франківськ, Україна

ORCID ID: 0009-0000-0309-6587

²к.т.н, доцент кафедри транспортування та зберігання енергоносіїв,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-
Франківськ, Україна

ORCID ID: 0000-0002-6424-7569

Анотація

Вступ. В даний час велика увага приділяється якості спорудження та ремонту трубопроводів. Питання якості зварювання вважається одним з найважливіших в даному напрямку. Першочерговими завданнями при зварюванні є: грамотний вибір технологічного оснащення; вибір методу зварювання та методика підготовки під зварювання. Основним завданням всіх видів зварювання є якісне виконання зварювання неповоротних стиків труб. Головна проблема зварювання неповоротних стиків труб полягає в тому, що при зварюванні постійно змінюється просторове положення зварювальної ванни. На зварювальну ванну в кожному положення діють різні сили. Це ускладнює завдання формування кореневого та наступних шарів шва у зв'язку з виникненням пропалів, напливів та інших дефектів. Для прискорення процесу зварювання неповоротних стиків труб та отримання якісно виконаного зварного з'єднання широко застосування отримали механізовані методи зварювання. **Мета.** Дана стаття розширює аналіз впливу ключових елементів хімічного складу сталей на якість їх зварних з'єднань. **Результати.** У праці проаналізовано дослідження науковців, які стверджують, що хімічний склад сталі магістральних та промислових трубопроводів суттєво впливає на якість зварювання. Це визначається вмістом основних легуючих елементів та шкідливих домішок, які впливають на формування структури металу шва та зони термічного впливу, а також на схильність до утворення дефектів. **Висновки.** 1. Хімічний склад сталі є визначальним фактором її зварюваності та, відповідно, якості зварних швів. Різноманітні хімічні елементи по-різному впливають на процес зварювання, схильність до утворення дефектів і кінцеві механічні властивості зварного з'єднання. 2. Встановлено, що вплив хімічного складу сталі магістральних та промислових трубопроводів на якість зварювання є критично важливим. Хімічний склад сталі, з якої виготовлені труби, безпосередньо впливає на її зварюваність, визначаючи ризик виникнення дефектів та механічні властивості зварного шва.

Ключові слова: зварювання, домішки, зварне з'єднання, кореневий шар зварного шва, зварювальне обладнання.



INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF STEEL OF MAIN
AND INDUSTRIAL PIPELINES ON WELDING QUALITY

R.T. Martynyuk¹, O.T. Chernova²

¹PhD, Associate Professor, Department of Transportation and Storage of Energy Carriers,
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine
ORCID ID: 0009-0000-0309-6587

²PhD, Associate Professor, Department of Transportation and Storage of Energy Carriers,
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-6424-7569

Summary

Introduction. At present, considerable attention is being paid to the quality of pipeline construction and repair. The quality of welding is considered one of the most important issues in this field. The primary tasks in welding include the proper selection of technological equipment, the choice of a welding method, and the procedure for joint preparation prior to welding. The main objective of all welding processes is to ensure high-quality welding of non-rotatable pipe joints. The main problem in welding non-rotatable pipe joints lies in the fact that the spatial position of the weld pool continuously changes during welding. Different forces act on the weld pool in each position, which complicates the formation of the root pass and subsequent weld layers due to the occurrence of burn-throughs, overlaps, and other defects. To accelerate the welding process of non-rotatable pipe joints and to obtain high-quality welded joints, mechanized welding methods have been widely adopted. **Purpose.** This article expands the analysis of the influence of key elements of the chemical composition of steels on the quality of their welded joints. **Results.** The paper analyzes studies conducted by researchers who argue that the chemical composition of steels used for mainline and industrial pipelines significantly affects welding quality. This is determined by the content of major alloying elements and harmful impurities, which influence the formation of the weld metal and heat-affected zone microstructure, as well as the susceptibility to defect formation. **Conclusions.** 1. The chemical composition of steel is a determining factor in its weldability and, consequently, in the quality of welded seams. Various chemical elements affect the welding process, the tendency to defect formation, and the final mechanical properties of the welded joint in different ways. 2. It has been established that the influence of the chemical composition of steels used for mainline and industrial pipelines on welding quality is critically important. The chemical composition of the steel from which the pipes are manufactured directly affects their weldability, determining the risk of defects and the mechanical properties of the weld seam.

Key words: welding, impurities, welded joint, root pass of the weld seam, welding equipment.

Вступ.

Хімічний склад сталі, з якої виготовлені трубопроводи, є одним із найважливіших чинників, що визначають її зварюваність (здатність утворювати якісне зварне з'єднання). Теоретичні та практичні результати досліджень науковців свідчать про прямий зв'язок між вмістом в сталях легованих елементів та ризиком виникнення дефектів.

Сучасні високоміцні сталі, які використовуються для магістральних та промислових трубопроводів є термічно і механічно обробленими низьковуглецевими сталями. При виготовленні труб з низьковуглецевих сталей передбачають низький вміст сірки та фосфору для того, щоб мінімізувати ризик утворення гарячих тріщин і забезпечити механічні властивості зварного шва. Низький вміст вуглецю забезпечує добру зварюваність і знижує схильність до тріщиноутворення. Введення до складу сталі в мінімальній кількості легованих елементів (менше 0,1 %) проводять з метою покращення їх механічних властивостей, таких як міцність і в'язкість. Результат впливу легованих елементів полягає в тому, що процес зварювання повинен бути чітко адаптований під хімічний склад сталі трубопроводу, щоб гарантувати отримання зварного з'єднання з необхідними експлуатаційними характеристиками. Для проведення якісного зварювання необхідно проводити контроль за технологічними процесами (попередній підігрів або прогрів) та використання зварювальних матеріалів, що забезпечують необхідний хімічний склад і механічні властивості наплавленого металу.

Формулювання цілей статті. За допомогою аналізу та систематизації впливу ключових елементів хімічного складу сталей (вуглецю, марганцю, кремнію, хрому, молібдену, нікелю тощо) проаналізувати необхідний взаємозв'язок між хімічним складом сталей трубопроводів і якістю зварних швів [2].

Наукова новизна дослідження полягає у аналізі існуючих моделей, що описують кількісний вплив легованих елементів на показники якості зварювання; детальний аналіз кінетики фазових та структурних перетворень у металі шва; виявлення закономірностей, які стосуються деградації зварних з'єднань трубопроводів довготривалої експлуатації.

Виклад основного матеріалу.

Зварювання металу залежить від його хімічних та фізичних властивостей, кристалічної решітки сталі, наявності домішок. Хімічний склад сталі, з якої виготовлені магістральні та промислові трубопроводи, є визначальним фактором надійності зварних з'єднань. Леговані елементи впливають на формування мікроструктури зварного з'єднання. Найбільш важливий легований елемент – вуглець. Добру зварюваність забезпечує вміст вуглецю в межах від 0,22 % до 0,25 %. Зі збільшенням вмісту вуглецю збільшується міцність і твердість сталі, але знижується її пластичність [3].

Показником зварюваності є еквівалентний вміст вуглецю в сталі. В залежності від еквівалентного вмісту вуглецю зварювання поділяють на чотири групи: добре, задовільне, обмежене та погане. Еквівалентний вміст вуглецю визначаємо за формулою

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2}, \quad (1.1)$$

де C , Mn , Cr , Ni , Cu , P – леговані елементи у металі шва.

Еквівалент розміру вуглецю визначаємо за формулою

$$C_p = 0,005 \cdot \delta \cdot C_e, \quad (1.2)$$

де δ – товщина стінки трубопроводу.

Температуру, необхідну для нагрівання зварного з'єднання визначаємо за формулою

$$T_n = 350 \cdot \sqrt{\sum C_e - 0,25} \quad (1.3)$$

Крім того, на зварюваність впливає вміст в сталі легованих елементів, таких як марганцю, кремнію, сірки та фосфору. Марганець та кремній – типові розкислювачі. Марганець покращує пластичність і знижує ймовірність утворення гарячих тріщин. Кремній підвищує плинність металу під час зварювання, але, водночас, високий вміст кремнію може привести до утворення газових пор, а високий вміст марганцю може посилювати схильність до загартування сталі.

Сірка та фосфор – шкідливі домішки, які при перевищенні норми погіршують зварюваність. Оптимальний вміст сірки повинний бути в межах від 0,025 % до 0,04 %, а фосфору від 0,035 % до 0,030 %. Вміст більшого відсотку сірки сприяє утворенню сульфідів заліза. Це викликає утворення гарячих тріщини в зварному шві. При перевищенні фосфору збільшується крихкість металу та знижується ударна в'язкість [5].

Леговані елементи, такі як кремній, нікель, молібден та титан додають в сталь з метою підвищення міцності та корозійної стійкості сталі. Для виготовлення сучасних трубопровідних систем використовують низьковуглецеві леговані сталі з контрольованим вмістом легованих елементів. Це дає змогу досягнути високу міцність сталі та забезпечити добру зварюваність зварного шва.

Для деталізації зварного з'єднання розглянемо його тепловий цикл (рисунок 1).

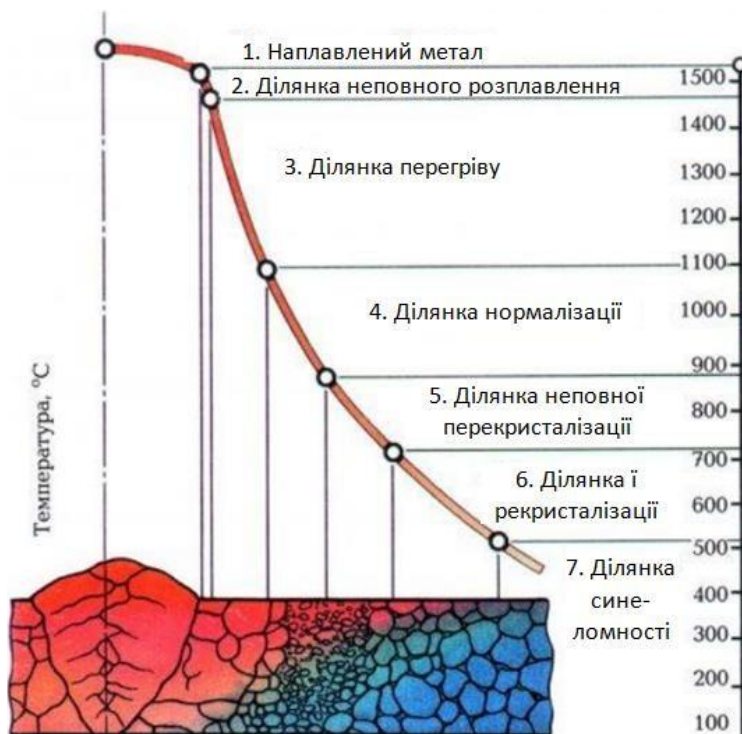


Рис. 1. Тепловий цикл зварного з'єднання

Кожен метал складається з зерен, яких можна бачити на зламі. У металі розрізняють макро- та мікроструктуру. Макроструктуру можна побачити неозброєним оком, а мікроструктуру вивчають зі збільшенням від 60 до 100 раз під мікроскопом.

На ділянці 1 наплавлений метал знаходиться в розплавленому стані, який має структуру зі стовпчастих кристалів. Це несприятливо позначається на зварному шві де відбувається зниження міцності та пластичності металу. Зона термічного впливу складається з кількох ділянок, які відрізняються між собою формою та будовою зерна. Ці відмінності викликані різною температурою нагріву (до 1530 °С). Ширина 1 ділянки становить половину ширини зварного шва. На 2 ділянці під час зварювання відбувається нагрівання та перехід від основного до наплавленого металу, а також зростання зерен. Межа сплавлення є вузькою від 0,1 до 0,4 мм, тому дана ділянка є найслабшим місцем зварного з'єднання, з температурою від 1470 до 1470 °С. Ділянка 3 – область основного металу, що нагрівається до температури від 1100 до 1470 °С. Метал має крупнозернисту структуру. Чим більша зона нагрівання тим більше зерно та нижче механічні властивості. Ширина даної ділянки від 3 до 4 мм. На ділянці нормалізації 4 метал нагрівається від 880 до 1100 °С. Процес перекристалізації металу відбувається без перегрівання та з утворенням дрібнозернистої структури. Ширина 4 ділянки становить від 0,2 до 0,4 мм. 5 – ділянка неповної перекристалізації. Причина неповної перекристалізації – недостатня температура нагріву. Структура цієї ділянки складається з дрібних зерен, а ширина від 0,1 до 0,3 мм. В порівнянні з 4 ділянкою, метал цієї ділянки має нижчі механічні властивості. Ділянка рекристалізації 6. Метал у цій зоні нагрівається до температури 720 °С. Як наслідок, відбувається зростання зерна металу, структура стає грубішою. Ширина ділянки – від 0,1 до 1,5 мм.

Ділянка 7. На ній нагрівання проводять при температурі від 200 до 510 °С. Ця є перехідна ділянка. На ній можливе випадання карбідів заліза, та механічні властивості металу знижуються.

Неналежний хімічний склад трубопровідної сталі та невірно підібраний режим зварювання може призвести до [6]:

- утворення тріщин (холодних та гарячих). Холодні тріщини виникають під час охолодження зварного з'єднання, гарячі утворюються під час кристалізації;
- погіршення механічних властивостей. Недостатня міцність зварного шва може призвести до його руйнування;
- несплавлення. Невірно підібраний склад сталі може призвести до поганого зварювання та сприяти утворенню газових пор;
- зниження корозійної стійкості. Концентрація деяких легованих елементів може сприяти утворенню в зварному шві корозії;
- шлакові включення. Елементи, що окислюються можуть утворювати тугоплавкі оксиди, а це, в свою чергу, приводить до утворення шлакових включень. Також процес окислення легованих елементів може змінити хімічний склад металу шва і погіршити його механічні властивості.

Висновок.

Якість зварювання магістральних та промислових трубопроводів залежить від хімічного складу сталі, з якої вони виготовлені. Для забезпечення якісного зварного шва та хорошої зварюваності трубопровідна сталь повинна мати:

- низький вміст вуглецю;
- малий вуглецевий еквівалент;
- обмежену кількість легуючих елементів;
- мінімальну кількість сірки та фосфору.

Якість зварювання трубопроводів є критичним фактором безпеки, довговічності та герметичності всієї системи. Вона повинна забезпечуватись на всіх етапах – від підготовки труби до контролю готового шва [7].

ЛІТЕРАТУРА

1. Мартинюк Р. Т. Визначення характеристик циклічної тріщиностійкості трубної сталі та її зварного з'єднання. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2011. № 2 (39). С. 83–86. URL: <http://elar.nung.edu.ua/bitstream/123456789/3852/1/1054p.pdf>
2. Костін О. М. Зварювальні матеріали: навч. посібник. Миколаїв : НУК, 2004. 225 с. <https://studfile.net/preview/433590/>
3. Мартинюк Р. Т., Грудз В. Я., Чернова О. Т. Оптимізація якості спорудження та ремонту трубопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2006. Т. 19. № 2. С. 81–84.
4. Чернова О. Т. Термічна обробка зварних з'єднань трубопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2001. № 3 (38). С. 69–73.
5. Афтанділянц Є. Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Частина 2. Металознавство. Київ : Видавничий центр НАУ, 2006. 386 с. https://library.kpi.kharkov.ua/files/new_postupleniya/aftandilmater.pdf
6. Мартинюк Р. Т. Контроль герметичності магістральних газопроводів. *Прикарпатський вісник НТШ*. 2017. № 1 (37). С. 249–260. URL: <http://pvntsh.nung.edu.ua/index.php/pv/article/view/280>
7. Грудз В. Я., Мартинюк Р. Т., Чернова О. Т. та ін. Основні критерії якості спорудження магістральних трубопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2010. № 2 (35). С. 121–125.
8. Чернова О. Т., Мартинюк Р. Т., Мартинюк Т. А. Комплексна механізація будівництва та ремонту трубопроводів: навчальний посібник. Івано-Франківськ : Факел, 2012. 286 с. ISBN 978-966-694-170-4.
9. Сологуб М. А., Рожнецький І. О., Некоз О. І. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство. Київ : Техніка, 2002. 374 с.
10. Мартинюк Р. Т. Просвічування зварних швів рентгенівськими та гама-променями. Наука в епоху дисбалансів: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 25 січня 2016 р.). Київ, 2016. Ч. 2. С. 76–79.

REFERENCES

1. Martyniuk, R. T. (2011). Determination of cyclic crack resistance characteristics of pipe steel and its welded joint [Vyznachennia kharakterystyk tsyklichnoi trishchynostiikosti trubnoi stali ta yii zvarnoho ziednannia]. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, (2), 83–86. <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/1897> [in Ukrainian].

2. Kostin, O. M. (2004). Welding materials: textbook [Zvariuvalni materialy: navch. posibnyk]. NUK [in Ukrainian].
3. Martyniuk, R. T., Hrudz, V. Ya., & Chernova, O. T. (2006). Optimization of quality of construction and repair of pipelines [Optymizatsiia yakosti sporudzhennia ta remontu truboprovodiv]. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, 19 (2), 81–84. [in Ukrainian].
4. Chernova, O. T. (2001). Thermal treatment of welded joints of pipelines [Termichna obrobka zvarnykh ziednan truboprovodiv]. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, (3), 69–73 [in Ukrainian].
5. Aftandiliants, Ye. H., Zazymko, O. V. & Lopatko, K. H. (2006). Technology of structural materials and materials science. Part 2. Metal science [Tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv i materialoznavstvo. Chastyna 2]. *Metaloznavstvo*. Nauy Publishing Center [in Ukrainian].
6. Martyniuk, R. T. (2017). Tightness control of main gas pipelines [Kontrol hermetychnosti mahistralnykh hazoprovodiv]. *Prykarpatskyi Visnyk NTSh*, (1), 249–260. <http://pvntsh.nung.edu.ua/index.php/pv/article/view/280> [in Ukrainian].
7. Hrudz, V. Ya., Martyniuk, R. T., Chernova, O. T., et al. (2010). Basic quality criteria for the construction of trunk pipelines [Osnovni kryterii yakosti sporudzhennia mahistralnykh truboprovodiv]. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, (2), 121–125 [in Ukrainian].
8. Chernova, O. T., Martyniuk, R. T., & Martyniuk, T. A. (2012). Complex mechanization of construction and repair of pipelines: textbook [Kompleksna mekhanizatsiia budivnytstva ta remontu truboprovodiv: navchalnyi posibnyk]. Fakel [in Ukrainian].
9. Solohub, M. A., Rozhnetskyi, I. O., & Nekozy, O. I. (2002). Technology of structural materials and materials science [Tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv ta materialoznavstvo]. Tekhnika [in Ukrainian].
10. Martyniuk, R. T. (2016). X-ray and gamma-ray inspection of welds [Prosvichuvannia zvarnykh shviv renthenivskymy ta hama-promeniamy]. *Science in the era of imbalances: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (Part 2, pp. 76–79) [in Ukrainian].

Дата першого надходження статті до видання: 22.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 26.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026

Наукове видання

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

Випуск 1(28), 2026

Засновник – Одеський національний морський університет

*Українською
та англійською мовами*

Видається з жовтня 2016 р.

Формат 70×108/16. Гарнітура Times New Roman.
Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 13,13.
Замов. № 0426/363. Наклад 200 прим.
Дата розміщення онлайн – 30.04.2026 р.
Дата друку – 05.05.2026 р.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1
Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.

Scientific publication

TRANSPORT DEVELOPMENT

Scientific journal

Issue 1(28), 2026

Founded by Odessa National Maritime University

In Ukrainian and English

Since October 2016

Format 70×108/16. Times New Roman Font.
Offset. Digital printing. Conventional printed sheet 13,13.
Order No 0426/363. Edition of 200 copies.
Date posted online – 30.04.2026
Date printed – 05.05.2026

Publishing House “Helvetica”
65101, Ukraine, Odessa, 6/1 Inglizi St.
Phone: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Certificate of publishing entity
ДК № 7623 as of 22.06.2022