

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

ВИПУСК 3(26), 2025

Заснований у жовтні 2016 року



Видавничий дім
«Гельветика»
2025

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

№ 3(26)
2025

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 – д.т.н., проф. *Руденко С.В.*
Заступник головного редактора – д.е.н., проф. *Савельєва І.В.*
Відповідальний секретар – д.т.н., доц. *Мінчев Д.С.*

Члени редакційної колегії:

Варбанець Р.А., д.т.н., проф., ОНМУ;
Дубровський М.П., д.т.н., проф., ОНМУ;
Єгунов К.В., д.т.н., проф., ОНМУ;
Постан М.Я., д.е.н., проф., ОНМУ;
Кириллова О.В., д.т.н., проф., ОНМУ;
Липкіна І.О., д.е.н., проф., ОНМУ;
Пітерська В.М., д.т.н., проф., ОНМУ;
Малаксіано М.О., д.т.н., проф., ОНМУ;
Немчук О.О., к.т.н., доц., ОНМУ;
Мельников С.В., к.е.н., доц., ОНМУ;
Філіна-Давидович Л.С., д.т.н., Західнопоморський технологічний університет, Щецин, Польща;
Аймелек Мурат, PhD, Ізмірський Університет імені Катіна Челебі, Туреччина;
Малекі Вішкарі Бехзад, PhD, Вільний міжнародний університет соціальних досліджень імені Гвідо Карлі, Італія;
Колмикова Анна, DSc, Бременський університет, Німеччина;
Любоміров Славі Ясенов, PhD, Пловдивський університет імені Паїсія Гілендарського, Болгарія;

Духовник Йосе, DSc, Люблянський університет, Словенія;
Гасанов В., д.т.н., проф., Азербайджанська державна морська академія, Азербайджан;
Садигов В., к.т.н., доц., Азербайджанська державна морська академія, Азербайджан;
Дашковський Сергій, DSc, Вюрцбурзький університет імені Юліуса та Максиміліана, Німеччина;
Клюс Олег, DSc, Морська Академія в Щецині, Польща;
Цисар Чаба, PhD, Будапештський університет технологій та економіки, Угорщина;
Нзок Ан Мін, PhD, Технологічний університет Кочі, Японія;
Медведев Олександр, DSc, Інститут транспорту та зв'язку, Латвія;
Попова Олена, DSc, Інститут транспорту та зв'язку, Латвія;
Мезітіс Марекс, DSc, Транспортна академія, Латвія;
Нам Кю Парк, PhD, Університет ТонгМьонг, Південна Корея.

Рецензенти: д.т.н., проф. Мельник О.М., к.т.н., доц. Кучеренко Ю.М.,
д.е.н., проф. Холоденко А.М., д.т.н., проф. Білоусов Є.В., д.т.н., доц. Головань А.І.

Рекомендовано до друку Вченою радою
Одеського національного морського університету
(протокол № 4 від 24.09.2025 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.

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

ODESSA
NATIONAL MARITIME UNIVERSITY

TRANSPORT DEVELOPMENT

Scientific journal

ISSUE 3(26), 2025

Founded in October 2016



Publishing House
"Helvetica"
2025

ODESSA
NATIONAL MARITIME UNIVERSITY
TRANSPORT DEVELOPMENT
SCIENTIFIC JOURNAL

№ 3(26)
2025

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: Doctor of Engineering, Professor *Rudenko S.V.*
Deputy Editor-in Chief: DSc, Professor *Savelieva I.V.*
Executive Secretary: DSc, Associate Professor *Minchev D.S.*

Editorial Board Members:

DSc, Prof. *Varbanets R.A.*, ONMU;
DSc, Prof. *Dubrovskiy M.P.*, ONMU;
DSc, Prof. *Yehupov K.V.*, ONMU;
DSc, Prof. *Postan M.Ia.*, ONMU;
DSc, Prof. *Kyryllova O.V.*, ONMU;
DSc, Prof. *Lapkina I.O.*, ONMU;
DSc, Prof. *Piterska V.M.*, ONMU;
DSc, Prof. *Malaksiano M.O.*, ONMU;
PhD, Associate Prof. *Nemchuk O.O.*, ONMU;
PhD, Associate Prof. *Melnyk S.V.*, ONMU;
Filina-Davidovych L.S., Doctor of Engineering,
West Pomeranian University of Technology,
Szczecin, Poland;
Aymelek Murat, PhD, Izmir Katip Celebi University,
Turkey;
Maleki Vishkaei Behzad, PhD, Luiss University, Italy;
Kolmykova Anna, DSc, University of Bremen,
Germany;
Lyubomirov Slavi Yasenov, PhD, University
of Plovdiv Paisii Hilendarsk, Bulgaria;

Duhovnik Joze, DSc, University of Ljubljana, Slovenia;
Gasanov V., Doctor of Engineering, Professor,
Azerbaijan State Marine Academy, Azerbaijan;
Sadigov V., PhD in Engineering, Associate Professor,
Azerbaijan State Marine Academy, Azerbaijan;
Dashkovskiy Sergey, DSc, Julius-Maximilians
University of Wurzburg, Germany;
Klyus Oleh, DSc, Maritime University of Szczecin,
Poland;
Csiszar Csaba, PhD, Budapest University
of Technology and Economics, Hungary;
Ngoc An Minh, PhD, Kochi University
of Technology, Japan;
Medvedev Alexander, DSc, Transport
and telecommunication institute, Latvia;
Popova Jelena, DSc, Transport
and telecommunication institute, Latvia;
Mezitis Mareks, DSc, Transport Academy, Latvia;
Nam Kyu Park, PhD, TongMyong University,
South Korea.

Reviewers: DSc (Engineering), Prof. *Melnyk O.M.*, PhD (Engineering), Assoc. Prof. *Kucherenko Yu.M.*,
DSc (Economics), Prof. *Kholodenko A.M.*, DSc (Engineering), Prof. *Bilousov Ye.V.*, DSc (Engineering),
Assoc. Prof. *Holovan A.I.*

Recommended for printing by the Academic Council of Odessa National Maritime University
(Minutes No 4 dated September 24, 2025)

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

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

О.В. Грицюк, О.О. Сулима

Розробка українського автомобільного малолітражного дизеля:
30 років еволюції від мотоциклетного до автобусного двигуна.....7

МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

А.М. Ібрагім, К.М. Клевцов

Аналітична оцінка ризиків та можливостей оптимізації енергоефективності
в морських мультимодальних перевезеннях:
SWOT-аналіз застосування паливних присадок.....19

М.Б. Капочкіна, Н.В. Кучеренко

Результати експерименту з визначення дальності розповсюдження звуку
в шельфовій зоні Чорного моря.....35

О.В. Кириллова, В.Ю. Кириллова

Концептуалізація ситуативної PL (Party Logistics)-ідентифікації
постачальників транспортних послуг.....50

О.А. Куропятник

Підтримання екологічності морських суден під час використання систем
каталітичного відновлення випускних газів суднових дизелів.....73

С.В. Сагін, О.А. Куропятник

Використання системи рециркуляції випускних газів низького тиску
для забезпечення екологічних показників суднових дизелів.....87

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

С.П. Онищенко, О.М. Мельник, О.Л. Дрожжин, Ю.А. Бондаренко

Визначення складу флоту та його розподіл за лініями
в умовах невизначеності контейнеропотоків.....100

Д.І. Скуріхін, А.О. Ловська, В.Г. Равлюк, А.В. Рибін

Цифрові технології підтримки життєвого циклу залізничного рухомого складу:
аналітика та вектори розвитку.....113

C O N T E N T S

INDUSTRIAL MECHANICAL ENGINEERING

O.V. Grytsyuk, O.O. Sulyma
Development of Ukrainian Automotive Small-Displacement Diesel Engine:
30 Years of Evolution from Motorcycle to Bus Engine.....7

SEA AND INLAND WATER TRANSPORT

A.M. Ibrahim, K.M. Klevtsov
Optimization of energy efficiency and risk assessment for its implementation
in marine multimodal eco-oriented transportation.....19

M.B. Kapochkina, N.V. Kucherenko
Results of an experiment to determine the range of sound propagation
in the shelf zone of the Black Sea.....35

O.V. Kyrylova, V.Yu. Kyrylova
Conceptualization of situational PL (Party Logistics) identification
of transport service providers.....50

O.A. Kuropyatnyk
Maintaining the environmental friendliness of seagoing vessels when using
catalytic reduction systems for marine diesel engines.....73

S.V. Sagin, O.A. Kuropyatnyk
Using a low-pressure exhaust gas recirculation system to ensure
the environmental performance of marine diesel engines.....87

TRANSPORT TECHNOLOGIES (BY TYPE)

S.P. Onyshchenko, O.M. Melnyk, O.L. Drozhzhyn, Y.A. Bondarenko
Fleet optimization and its distribution on the lines under container
flows uncertainty.....100

D.I. Skurikhin, A.O. Lovska, V.H. Ravlyuk, A.V. Rybin
Digital Technologies in the Lifecycle Management of Railway Rolling Stock:
Analytical Overview and Development Paths.....113

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.436.1

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2025.3-26.01>

РОЗРОБКА УКРАЇНСЬКОГО АВТОМОБІЛЬНОГО МАЛОЛІТРАЖНОГО ДИЗЕЛЯ: 30 РОКІВ ЕВОЛЮЦІЇ ВІД МОТОЦИКЛЕТНОГО ДО АВТОБУСНОГО ДВИГУНА

О.В. Грицюк¹, О.О. Сулима²

¹ д-р техн. наук, професор, професор кафедри двигунів внутрішнього згорання,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-5596-6254

² магістр за спеціальністю «Системний аналіз і управління» НТУ «ХП»,
Senior Software Engineer at TapClicks, Харків, Україна

Анотація

Вступ. Тридцять років досвіду – це справжня скарбниця знань для будь-якої підгалузі машинобудування, у тому числі двигунобудування. Модульний ряд малолітражних рядних автомобільних дизелів від одного до шести циліндрів з найпопулярнішим зараз робочим об'ємом одного циліндра 0,5 дм³ уже протягом 30 років створює Харківське конструкторське бюро з двигунобудування, фактично заклавши фундамент такого конструктивного параметра. Минулі три десятиліття стали справжньою кузницею компетенцій для дизелебудівної галузі України, яка ніколи раніше не мала досвіду створення малолітражних автомобільних дизелів не для комерційної, не для спеціалізованої техніки. Надати читачам відповіді на питання щодо добре відпрацьованого портрета вітчизняного автомобільного дизеля, виготовлення певної партії різних марок вітчизняних двигунів та проведення їх випробувань у складі конкретних транспортних засобів і стало завданням авторів цієї статті. **Мета.** Ця стаття має на меті систематизувати набутий за 30 років досвід проектування модульного ряду вітчизняних автомобільних малолітражних дизелів для передачі знань наступному поколінню інженерів. **Результати.** Визначено, що створені за 30 років та апробовані у складі чотириколісних мотоциклів та автомобілів вітчизняні автомобільні малолітражні дизелі мають шість різних портретів, а саме ДТ, ДТН, ДТА, ДТНА, ДТНА1 і ДТНА2. Проте більш перспективними в майбутньому було визначено дизелі портрета ДТНА1. Тому саме вони були дуже гарно і в потрібному обсязі відпрацьовані, у тому числі під час експлуатації безпосередньо в об'єктах їх застосування. При цьому особливу увагу сконцентровано на визначальних випробуваннях автомобільного дизеля 4ДТНА1 у складі автобуса РУТА-25d та офіційних попередніх випробуваннях модернізованого автомобіля МА33 також із дизелем 4ДТНА1. **Висновки.** Визначено, що на сьогодні найбільш виправданою як технологічний досвід і створення компетенцій є розробка

малолітражних вітчизняних автомобільних дизелів портрета ДТНА1. При цьому найперспективнішими нішами для застосування дизелів марок такого портрета є спецтехніка, військові застосування та ринки з мени жорсткими екологічними вимогами, де простота й надійність важливіші за максимальну ефективність.

***Ключові слова:** малолітражні дизелі, портрет конструкції, модульний ряд, накопичений досвід, пріоритетне застосування.*

DEVELOPMENT OF UKRAINIAN AUTOMOTIVE SMALL-DISPLACEMENT DIESEL ENGINE: 30 YEARS OF EVOLUTION FROM MOTORCYCLE TO BUS ENGINE

O.V. Grytsyuk¹, O.O. Sulyma²

¹DSci., Prof., Professor of the Department of Internal Combustion Engines, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-5596-6254

²Master's degree in "Systems Analysis and Management" from NTU "KhPI" (National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"),
Senior Software Engineer at TapClicks, Kharkiv, Ukraine

Summary

Introduction. *Thirty years of experience represents a true treasure trove of knowledge for any subsector of mechanical engineering, including engine manufacturing. The modular series of small-displacement inline automotive diesel engines ranging from one to six cylinders, with the currently most popular displacement of 0.5 dm³ per cylinder, has been developed by the Kharkiv Design Bureau for Engine Manufacturing for 30 years, effectively laying the foundation for this design parameter. The past three decades have become a true forge of competencies for Ukraine's diesel engine industry, which had never previously had experience in developing small-displacement automotive diesel engines for either commercial or specialized vehicles. Providing readers with answers to questions regarding the well-developed profile of domestic automotive diesel engines, the manufacturing of specific batches of various domestic engine brands, and conducting their testing as part of specific vehicles became the objective of the authors of this article.* **Objective.** *This article aims to systematize the experience gained over 30 years in designing a modular series of domestic automotive small-displacement diesel engines for knowledge transfer to the next generation of engineers.* **Results.** *It has been determined that the domestic automotive small-displacement diesel engines developed over 30 years and tested in four-wheeled motorcycles and automobiles have six different profiles: DT, DTN, DTA, DTNA, DTNA1, and DTNA2. However, DTNA1 profile diesels were identified as more promising for the future. Therefore, these engines were thoroughly and adequately developed, including during operation directly in their application objects. Particular attention was focused on the definitive testing of the 4DTNA1 automotive diesel engine as part of the RUTA-25d bus and official preliminary testing of the modernized MA33 vehicle, also equipped with the 4DTNA1 diesel engine.* **Conclusions.** *It has been determined that currently, the development of small-displacement domestic automotive diesel engines with the DTNA1 profile is most justified as a technological experience and competency development. The most promising niches for applying diesel engines of this profile brand are specialized equipment, military*

applications, and markets with less stringent environmental requirements, where simplicity and reliability are more important than maximum efficiency.

Key words: *small-displacement diesel engines, design profile, modular series, accumulated experience, priority application.*

Вступ. У своїй минулорічній публікації [1] один з авторів цієї статті сконцентрував увагу на тому факті, що майже всі відомі автомобілебудівні фірми, починаючи з 2010 року й дотепер мають у своєму арсеналі моделі дизелів з робочим об'ємом одного циліндра 0,5 дм³. Але одним із перших у світі модульний ряд малолітражних рядних дизелів від одного до шести циліндрів з таким об'ємом циліндра створило Харківське конструкторське бюро з двигунобудування (ДП «ХКБД»), фактично заклавши фундамент такого конструктивного параметра. Історія цього нового напрямку робіт в українському дизелебудуванні почалася з двоциліндрової версії ще в 1989 році, і мало кому відомо, що, незважаючи на подальший широкий спектр застосування цих дизелів, об'єктом завдання для початку їх створення був чотириколісний мотоцикл [2], який належить до унікальної категорії транспортних засобів, що характеризуються наявністю чотирьох коліс, відкритою конструкцією, відсутністю кабіни та відносно компактними розмірами порівняно з автомобілями. У сучасній транспортній інфраструктурі чотириколісний мотоцикл (квадроцикл) посідає особливе місце, поєднуючи характеристики традиційних мотоциклів та деякі риси автомобілів. Тому двоциліндровий дизель у модифікації силової установки для квадроцикла здатен почати модульний ряд вітчизняних автомобільних дизелів розмірністю 8,8/8,2 з робочим об'ємом двох циліндрів 1 дм³.

Проте першими щодо апробації привода до руху коліс автомобілів стали наддувні модифікації ще тракторних дизелів первинної розмірності 7,9/8,2 у три- та чотирициліндровому виконанні (заводські індекси 3ДТН і 4ДТН). Вони першими були інтегровані із системами серійних автомобілів ЛуАЗ і «Волга» відповідно, їх уперше показали на виставці на честь 100-річчя від дня заснування теперішнього державного підприємства «Завод імені В. О. Малишева» в 1995 році [3] і там де-факто дали старт розробці українського автомобільного малолітражного дизеля вищезазначеної нової розмірності 8,8/8,2 (0,5 дм³ в одному циліндрі), додавши до заводського індексу літеру «А».

Минулі три десятиліття стали справжньою кузницею компетенцій для дизелебудівної галузі України, яка ніколи раніше не мала досвіду створення малолітражних автомобільних дизелів не для комерційної, не для спеціалізованої техніки.

Як розвиватися, коли домінує гасло, що ера дизельних двигунів добігає кінця? На якій елементній базі створювати вітчизняні малолітражні дизелі? У які транспортні засоби інтегрувати свої розробки? Надати читачам саме ті відповіді на ці питання, які сформували відпрацьований індивідуальний портрет автомобільних дизелів серії ДТНА, дали змогу виготовити певні партії вітчизняних двигунів та провести всі без винятку види їх випробувань у складі конкретних транспортних засобів, і стало завданням авторів цієї статті.

Мета – систематизувати набутий за 30 років досвід проектування модульного ряду вітчизняних автомобільних малолітражних дизелів для передачі знань наступному поколінню інженерів.

Результати. Проаналізувавши у джерелі [1] той суттєвий внесок у світовий розвиток автомобільного транспорту, який фактично відбувся паралельно з набуттям національних компетенцій під час створення та публічного висвітлення вагомих результатів різноманітних випробувань, ми вирішили узагальнити й залишити наступним поколінням увесь тридцятирічний досвід розробки вітчизняних автомобільних дизелів. Хоча повномасштабне комерційне впровадження не відбулося, накопичений досвід може стати основою для:

- розвитку спеціалізованих рішень для військової техніки;
- створення платформи для майбутніх інновацій у двигунобудуванні;
- формування експертизи для адаптації іноземних технологій;
- розробки гібридних рішень на стику традиційних та інноваційних підходів.

У світлі нещодавніх змін стратегії провідних автовиробників і пролонгації життєвого циклу дизельних двигунів такі альтернативні рішення можуть знайти своє місце в екосистемі майбутнього транспорту.

База автомобільного малолітражного дизелебудування

Базовим шляхом щодо визначального для ДВЗ вибору схеми організації сумішоутворення для єдиного типорозмірного (0,5 дм³ в одному циліндрі) уніфікованого ряду високооберткових малолітражних автомобільних дизелів серій ДТА (без наддуву) та ДТНА (з наддувом) стало попереднє рішення з вихорокамерного сумішоутворення (рис. 1), яке було вже реалізовано в серійному виробництві дизелів серії ДТ на ДП «Завод імені В. О. Малишева».

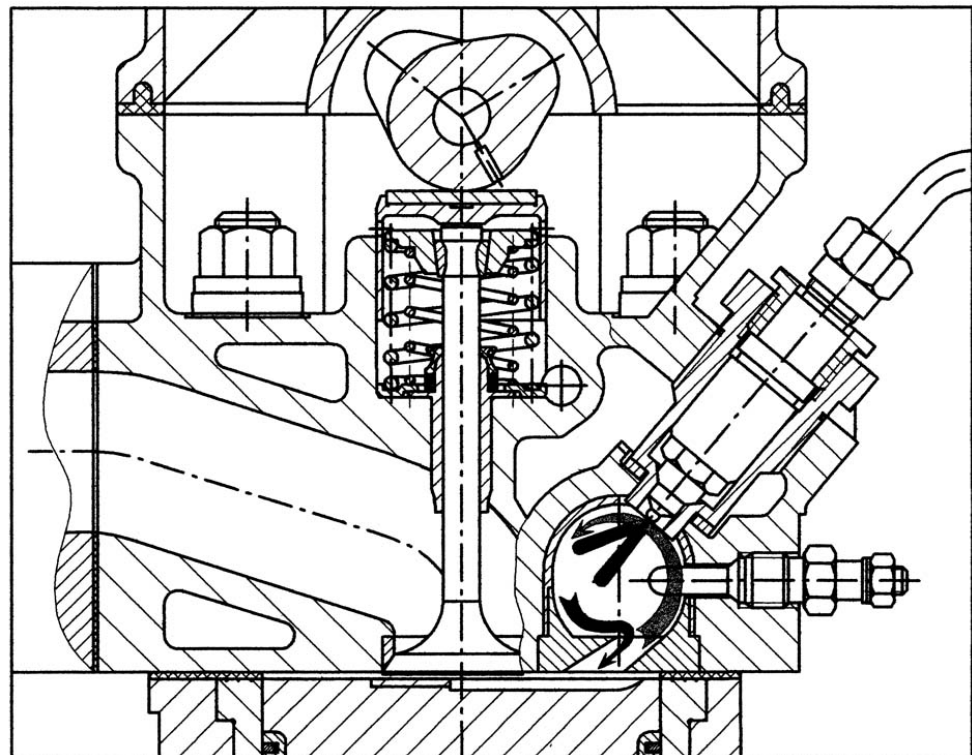


Рис. 1. Схема організації вихорокамерного сумішоутворення в дизелях серій ДТА і ДТНА

Саме за такою схемою були спроектовані автомобільні дизелі 2ДТАВ, 3ДТНА і 4ДТНА, та саме ї було найшвидше реалізувати в дослідних зразках і серійному виробництві. Від швидкості реалізації залежала можливість зайняти місце в подкапотних просторах уже розвинутого в Україні ринку автомобілів УАЗ та «Газель», і це мало великий резонанс, а інколи й обурення в розробників цих автомобілів, особливо головних конструкторів, які не оминули першу ж можливість побачити модернізовані дизелями ДТНА автомобілі безпосередньо в ХКБД. На думку авторів, саме це дало суттєвий поштовх для подальшої дизелізації вищезазначених автомобілів, але тільки зараз стає зрозумілим, а чому не українським дизелем. Проте особливу гордість ХКБД викликає майже двохсоттисячний пробіг автомобіля УАЗ-31512 з дослідним дизелем 4ДТНА№3 дорогами загального користування [1]. На думку авторів, це дуже велика рідкість для світового двигунобудування.

Створення власного портрета автомобільного малолітражного дизеля

Подальша «мозкова атака» [4–6] привела до безпосереднього впорскування палива, і вже в першому десятилітті теперішнього століття було паралельно відпрацьовано портрети дизелів ДТНА1 (рис. 2) і ДТНА2 (рис. 3) з безпосереднім упорскуванням палива та новими схемами сумішоутворення з двоклапанною та чотириклапанною головками циліндрів. При цьому розробка портрета ДТНА1 є найбільш виправданою як технологічний досвід та створення компетенцій. Для майбутнього найперспективніші ніші – це спецтехніка, військові застосування та ринки з менш жорсткими екологічними вимогами, де простота й надійність важливіші за максимальну ефективність.

Серед основних конструктивних відмінностей портрета ДТНА1 від авангардних автомобільних дизелів ДТНА такі:

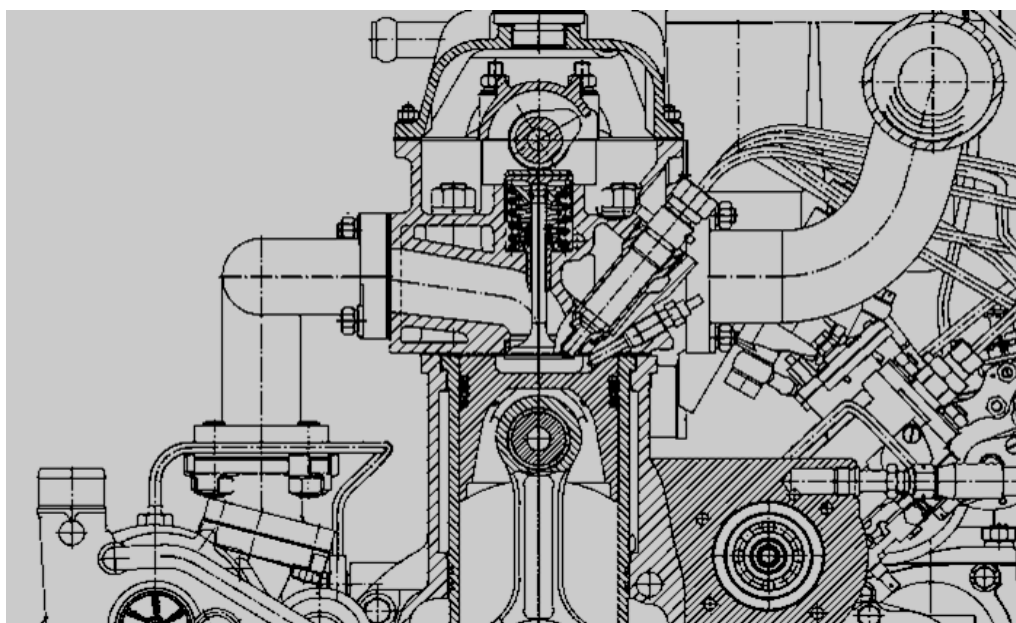


Рис. 2. Фрагмент поперечного перерізу дизеля портрета ДТНА1

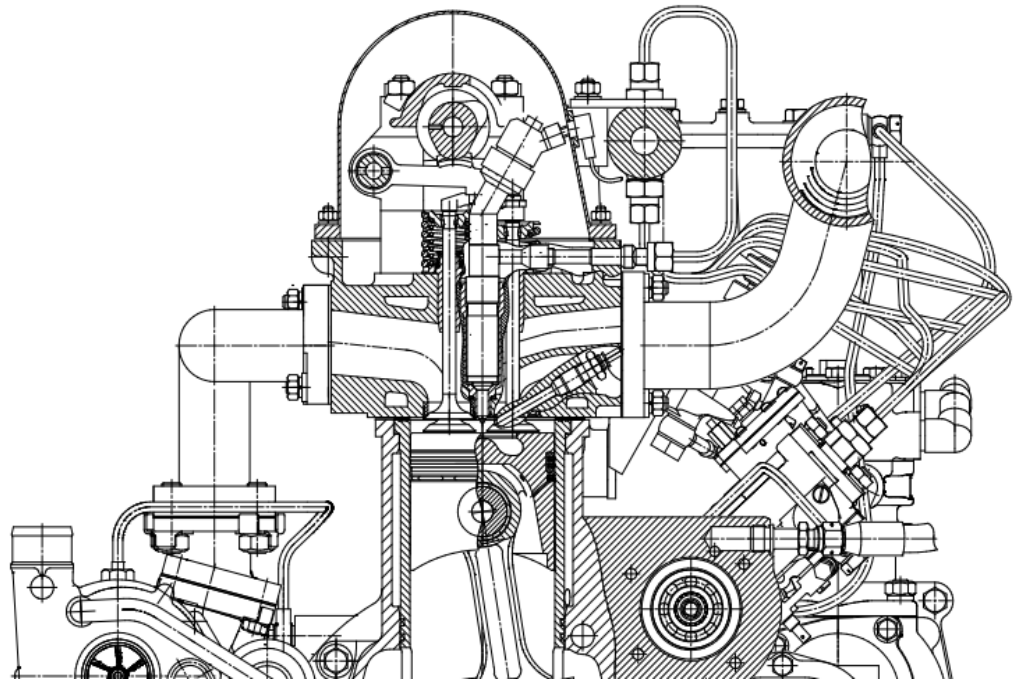


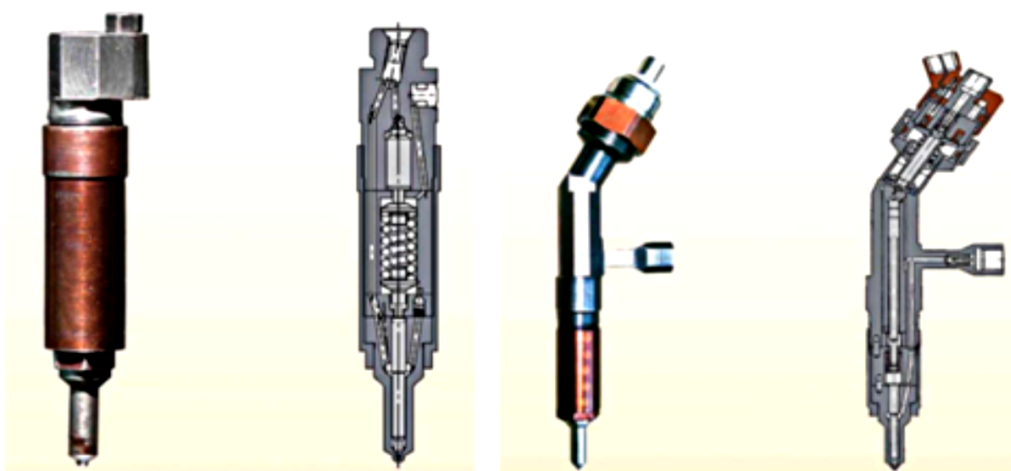
Рис. 3. Фрагмент поперечного перерізу дизеля портрета ДТНА2

- двоклапанна головка для безпосереднього упорскування палива зі зміщенням і нахилом осі форсунки відносно вертикальної осі циліндра;
- поршні з відкритою камерою згоряння з локальною турбулізацією заряду без зміщення осі її циліндричної частини від вертикальної осі циліндра;
- форсунки закритого типу з гідромеханічним способом керування голкою, диференційним поршнем і модулятором імпульсів тиску;
- розведені на дві сторони впускний і випускний тракти;
- проміжне охолодження наддувного повітря та регулювання тиску наддування залежно від частоти обертання та режиму роботи.

Портрет ДТНА2 (рис. 3) в основному варіанті оснащено вітчизняною акумуляторною паливною апаратурою з електронним управлінням паливоподачею. Це пропозиція суто для комерційного транспорту. Виготовлення дослідного зразка дизеля з таким портретом показало всі труднощі конкурування зі світовими лідерами в такому сегменті малолітражного дизелебудування й укріпило позицію створення та доведення до можливості серійного виробництва саме візитної картки українського малолітражного автомобільного дизеля – паливної апаратури типу НРМ (Hydraulik Pneumatik Mechanikal) [1; 8].

Обґрунтування необхідності механічної альтернативи системі Common Rail

Закриту форсунку з диференційним поршнем і модулятором імпульсів тиску вітчизняної паливної системи НРМ [1] порівняно з вітчизняною електрогідравлічною форсункою показано на рис. 4. До речі, обидві форсунки мають однакові посадочні місця щодо адаптера головки циліндрів. Тиск упорскування форсунки НРМ визначено для режимів форсування із середнім ефективним тиском $P_e = 0,66$ МПа за частоти обертання колінчастого вала 3000 хв⁻¹. Зі збільшенням



Тип	закрита, з диференціальним поршнем
Діаметр голки, мм	3,5
Тиск відкриття голки, МПа	18
Хід голки, мм	0,25
Діаметр розпилюючого отвору, мм	0,20
Кількість розпилюючих отворів	5
Тиск упорскування, МПа	70
Попередня подача режимів холостого ходу, мм ³ /цикл	2
Циклова подача, мм ³ /цикл	50

Тип	електрогідравлічна
Діаметр голки, мм	3,5
Хід голки, мм	0,25
Діаметр поршня, який управляє, мм	3,8
Діаметр розпилюючого отвору, мм	0,17
Кількість розпилюючих отворів	6
Тиск упорскування, МПа	140
Попередня подача, мм ³ /цикл	2
Циклова подача, мм ³ /цикл	50

Рис. 4. Форсунок паливних систем високого тиску дизелів портретів ДТНА1 і ДТНА2

форсування дизеля до $P_e = (1,1-1,3)$ МПа та частоти обертання до 4200 хв^{-1} максимальний тиск впорскування зростає до $P_f = (14-17)$ МПа і перевершує цей показник щодо електрогідравлічної форсунки.

Проте випробування перших дослідних зразків вітчизняних дизелів портрета ДТНА2 показало такі недоліки паливної системи високого тиску з електрогідравлічною форсункою:

- Складність виробництва форсунок:
 - прецизійна обробка з допусками в мікронах;
 - дороге матеріалознавство для магнітопроводів;
 - складні алгоритми керування електромагнітними клапанами;
 - висока вартість діагностичного обладнання.
- Енергетичні втрати:
 - паливний насос високого тиску споживає до 3–5 % потужності двигуна;
 - електромагнітні приводи форсунок потребують потужних драйверів;
 - постійний тиск у рампі навіть за холостого ходу.
- Експлуатаційні проблеми:
 - чутливість до якості палива;
 - засмічення прецизійних каналів;
 - корозія високоточних деталей;
 - складна діагностика несправностей.

Увесь залучений до цієї проблеми потенціал українських науковців і інженерів [2] не зміг вирішити жодної із цих проблем, тому подальші зусилля були спрямовані суто на доведення до можливості серійного виробництва українських дизелів портрета ДТНА1 з великою повагою до безпосередніх випробувань в умовах реальних об'єктів застосування цих ДВЗ.

Досвід ходових випробувань

Як уже висвітлено у джерелі [1], для вітчизняних дизелів портрета ДТНА1 свідоми передбачено безпосередньо у складі об'єкта застосування двигуна навіть формування потрібної зовнішньої швидкісної характеристики. Крім того, взаємодія з таким об'єктом потребує і відпрацювання закладених у двигун та його системи конструктивних рішень. Це насамперед системи пуску, змащення, охолодження, паливоподачі, впуску повітря та впуску відпрацьованих газів. Стендові умови доводки конструкції ДВЗ здебільшого моделюють експлуатаційні умови, але стендові результати не можуть бути остаточними без об'єктивних оцінок.

Перспективні в майбутньому вітчизняні дизелі саме індивідуального портрета ДТНА1 дуже гарно і в потрібному обсязі відпрацьовані (з прийняттям рішення та впровадженням конструктивних чи регулювальних заходів) під час експлуатації в об'єктах, фото яких зібрані на рис. 5. Що стосується саме дизелів ДТНА1, то особливу увагу, на думку авторів, потрібно сконцентрувати на визначальних випробуваннях автомобільного дизеля 4ДТНА1 у складі автобуса РУТА-25d [9] та офіційних попередніх випробуваннях модернізованого автомобіля МА33 [10].

Особливістю визначальних випробувань є те, що їх результатом повинно бути рішення щодо можливості адаптації вже існуючого доведеного ДВЗ до моторного відділення того чи іншого транспортного засобу, який не було узгоджено під час підготовки ТЗ на розробку нового двигуна та прописано в технічних умовах на його постачання. Такі випробування щодо автомобільного дизеля 4ДТНА1 було проведено у складі автобуса РУТА-25d, у якому серійно використовується двигун Cummins ISF 2,8s. Програма та методика цих складних випробувань була узгоджена й затверджена на самому високому рівні державних цивільних і військових відомств.

Після проведення такого етапу доводочних випробувань, як попередні випробування дослідного зразка, двигун перед серійним виробництвом має пройти тривалі випробування у складі об'єкта майбутнього застосування. Таким прикладом є повсякденна експлуатація автомобіля ГАЗ-33021 «ГАЗель» (номер державної реєстрації АХ3668СТ) державним підприємством «Харківський автомобільний завод». Цей автомобіль (рис. 5) у 2015 році було модернізовано дослідним зразком вітчизняного дизеля 4ДТНА1 (№ 6414070110К), який пройшов попередні стендові випробування у 2011 році, а попередні об'єктові випробування – у 2017 році.

Приклад спроможності вітчизняного виробничого потенціалу освоїти виробництво дизелів перспективного портрета наведено в інформації найсучаснішого джерела [11].

Таким чином, «естафетну паличку» щодо 30 років досвіду створення вітчизняного малолітражного автомобільного дизеля у дво-, три-, чотири- та шестициліндровому виконанні можна як мінімум вважати донесеною до наступного покоління інженерів двигунобудування України.



Серійний зразок чотириколісного
мотоциклу ЗІМ-800Д з дизелем 2ДТМ
(фото ДП «ЗІМ» 1998 року)



Мікрокар ЗІМ-1902 з дизелем 2ДТАВ
(фото ДП «ХКБД» 2002 року)



ЛуАЗ-13021Д з дизелем 3ДТНА
(фото ДП «ХКБД» 1998 року)



ЛуАЗ-1901Д «Геолог» з дизелем 3ДТНА1
(фото з автошоу SIA 1999 року)



Автобус РУТА-25d з дизелем 4ДТНА1
(фото Краматорський аеродром 2013 року)



Автомобіль МА33 з дизелем 4ДТНА1
(фото ДП «ХАЗ» 2021 року)

*Рис. 5. Вітчизняні об'єкти відпрацювання дизелів портретів
ДТ, ДТА, ДТНА і ДТНА1*

Висновки. Систематизований набутий за 30 років досвід проєктування модульного ряду вітчизняних автомобільних малолітражних дизелів дає змогу сформулювати такі основні висновки:

1. Створені й апробовані у складі чотириколісних мотоциклів та автомобілів вітчизняні автомобільні малолітражні дизелі мають шість індивідуальних портретів, а саме ДТ, ДТН, ДТА, ДТНА, ДТНА1 і ДТНА2.

2. На сьогодні розробка портрета ДТНА1 є найбільш виправданою як технологічний досвід і створення компетенцій.

3. Для майбутнього найперспективніші ніші для застосування вітчизняних дизелів портрету ДТНА1 – це спецтехніка, військові застосування та ринки з менш жорсткими екологічними вимогами, де простота та надійність важливіші за максимальну ефективність.

4. Хоча повномасштабне комерційне впровадження вітчизняних автомобільних дизелів не відбулося, накопичений досвід може стати основою для:

- розвитку спеціалізованих рішень для військової техніки;
- створення платформи для майбутніх інновацій у двигунобудуванні;
- формування експертизи для адаптації іноземних технологій;
- розробки гібридних рішень на стику традиційних та інноваційних підходів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Грицок О. В. Аналіз присутності прогресивних рішень вітчизняного високообертового малолітражного дизеля у двигунах світового автомобільного транспорту. *Розвиток транспорту*. 2024. № 2 (21). С. 17–27. DOI: 10.33082/td.2024.2-21.02.
2. Грицок О. В., Парсаданов І. В., Мотора О. А. Новий напрямок у дизелебудуванні України. *Двигуни внутрішнього згорання*. 2011. № 1. С. 48–53.
3. Рязанцев М. К. Мотори та долі. Про час та про себе. Харків : ХНАДУ. 2009. 272 с. ISBN 978-966-303-273-3.
4. Грицок О. В. Теоретичні основи та практичні методи створення високообертового малолітражного дизеля багатоцільового призначення : автореф. дис. доктора техн. наук : спец. 05.05.03 –двигуни та енергетичні установки. НТУ «ХПІ». Харків, 2010. 39 с.
5. Врублевський О. М. Наукові основи вибору параметрів акумуляторної паливної апаратури з електронним керуванням для високообертового дизеля : автореф. дис. д-ра техн. наук : спец. 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки. НТУ «ХПІ». Харків, 2011. 36 с.
6. Овчинніков О. О. Покращення показників високообертового автомобільного дизеля шляхом раціонального управління паливopoдачею. Автореф. дис. канд.-та техн. наук: спец. 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки. ХНАДУ. Харків. 2016. 20 с.
7. Ревелюк І. С. Вибір та обґрунтування параметрів силіконового демпфера крутильних коливань колінчастого вала високообертового

- дизеля : автореф. дис. канд-та техн. наук : спец. 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки. ХНАДУ. Харків, 2018. 20 с.
8. Грицюк О.В. Відповідальність головного конструктора за долю розробки. Збірник статей головного конструктора зі створення малолітражних дизелів. Saarbrucken, 2017. 90 с. ISBN 978-620-2-00678-1.
 9. Grytsyuk, O., Vrublevskiy, O. Investigations of diesel engine in the road test. *Diagnostyka*. 2018. Vol. 19 (2). P. 89–94. DOI: 10.29354/diag/90279.
 10. Акт попередніх випробувань автомобілів УАЗ та ГАЗ, модернізованих шляхом встановлення вітчизняного малолітражного дизеля. Харків : НВП Дизель Груп, 2017. 78 с.
 11. Грицюк О. В., Кузьменко А. П., Лазченко Б. О., Копилов В. В. Науково-технічний і виробничий потенціал України щодо виготовлення наукоємної продукції дизелебудування. Двигуни внутрішнього згоряння. 2024. № 2. С. 31–41. DOI: 10.20998/0419-8719.2024.2.05.

REFERENCES

1. Grytsyuk, O.V. (2024). Analysis of the presence of advanced solutions of the domestic high-revving small-capacity diesel in the engines of the world automobile transport [Analiz prysutnosti prohresyvnykh rishen vitchyznianoho vysokoobertovoho malolitrazhnoho dyzelia u dyvhunakh svitovoho avtomobilnoho transportu]. *Rozvytok transportu – Transport Development*, 2 (21), 17–27.
2. Grytsyuk, O.V., Parsadanov, I.V., Motora, O.A. (2011). A new direction in diesel construction in Ukraine [Novyi napriamok u dyzelebuduvanni Ukrainy]. *Internal combustion engines*, 1, 48–53.
3. Ryazantsev M.K. (2009). *Motors and Destinies. About Time and About Myself* [Motory ta doli. Pro chas ta pro sebe]. KhNAHU, Kharkiv, 272 p.
4. Grytsyuk, O.V. (2010). Theoretical foundations and practical methods of creating a high-revving low-displacement multi-purpose diesel engine [Teoretychni osnovy ta praktychni metody stvorennia vysokoobertovoho malolitrazhnoho dyzelia bahatotsilovoho pryznachennia]. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Kharkiv, 39 p.
5. Vrublevskiy, O.M. (2011). Scientific basis for selecting parameters of electronic controlled accumulator fuel equipment for high-speed diesel engines [Naukovi osnovy vyboru parametriv akumuliatornoj palyvnoi aparatury z elektronnym keruvanniam dlia vysokoobertovoho dyzelia]. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Kharkiv, 36 p.
6. Ovchinnikov, O.O. (2016). Improving the performance of a high-speed automotive diesel engine through rational fuel supply management [Pokrashchennia pokaznykiv vysokoobertovoho avtomobilnoho dyzelia shliakhom ratsionalnoho upravlinnia palyvopodacheiu]. *Extended abstract of Candidate's thesis*. Kharkiv, 20 p.

7. Revelyuk, I.S. (2018). Selection and Substantiation of Parameters for a Silicone Torsional Vibration Damper of a High-Speed Diesel Engine Crankshaft [Vybir ta obgruntuvannya parametriv sylikonovoho dempfera krutylnykh kolyvan kolinchastoho vala vysokoobertovoho dyzelia]. *Extended abstract of Candidate's thesis*. Kharkiv, 20 p.
8. Grytsyuk, O.V. (2017). Responsibility of the chief designer for the fate of the development. A collection of articles by the chief designer on the creation of small diesel engines [Vidpovidalnist holovnoho konstruktora za doliu rozrobky. Zbirnyk statei holovnoho konstruktora zi stvorennia malolitrzhnykh dyzeliv]. Saarbrucken: LAMBERT Academic Publishing. 90 p.
9. Grytsyuk, O.V., Vrublevskyi, O.M. (2018). Investigations of diesel engine in the road test [Doslidzhennia dyzelnoho dvyhuna pid chas dorozhnykh vyprobuvan]. *Diagnostyka*, 19 (2), 89–94.
10. Kharkiv: STC Diesel Group, (2017) Preliminary Testing Report for UAZ and GAZ Vehicles Modified by Installing a Domestic Small-Displacement Diesel Engine [Akt poperednykh vyprobuvan avtomobiliv UAZ ta HAZ, modernizovanykh shliakhom vstanovlennia vitchyznianoho malolitrzhnoho dyzelia]. 78 p.
11. Grytsyuk, O.V., Kuzmenko, A.P., Lazchenko, B.O., Kopylov, V.V. (2024). Scientific-technical and production potential of Ukraine for the production of scientific products of diesel construction [Naukovo-tekhnichnyi i vyrobnychiy potentsial Ukrainy shchodo vyhotovlennia naukoiemnoi produktsii dyzelebuduvannia]. *Internal combustion engines*, 2, 31–41.

Дата першого надходження рукопису до видання: 04.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 05.08.2025

Дата публікації: 30.10.2025

МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.6:629

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2025.3-26.02>

АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА РИЗИКІВ ТА МОЖЛИВОСТЕЙ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В МОРСЬКИХ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ: SWOT-АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ПАЛИВНИХ ПРИСАДОК

А.М. Ібрагім¹, К.М. Клевцов²

¹ аспірант «Кафедри транспортних технологій і судноремонту»,
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0009-0007-6007-5708

² д-р техн. наук, професор «Кафедри транспортних технологій і судноремонту»,
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-8486-1104

Анотація

Вступ. У статті розглядається актуальна проблема оптимізації енергоефективності в морських мультимодальних перевезеннях у контексті сучасних екологічних та економічних викликів. На тлі посилення вимог ІМО щодо скорочення викидів і зростання вартості палива судновласники потребують не лише нових технологій, а й надійних інструментів для оцінки ризиків їх запровадження. Стаття фокусується на методологічному підході до прийняття обґрунтованих управлінських рішень. **Мета.** Метою статті є обґрунтування застосування SWOT-аналізу як методологічного інструменту для аналітичної оцінки ризиків і можливостей під час запровадження енергозберігаючих технологій. Як практичний приклад для апробації цього методу розглянуто доцільність використання паливних присадок – технологічно доступного заходу, ефективність якого, однак, залежить від багатьох факторів і потребує комплексного аналізу перед імплементацією. **Результати.** У статті акцентовано увагу на практичному інструменті прийняття рішень – SWOT-аналізі. Продемонстровано, що цей метод дає змогу комплексно оцінити сильні та слабкі сторони застосування паливних присадок (зниження витрат палива проти їх вартості), а також зовнішні можливості та загрози (посилення екологічних норм проти появи неякісної продукції). Для підвищення об'єктивності проведено кількісну інтерпретацію аналізу, яка показала загальний позитивний рейтинг (0,158), що свідчить про доцільність запровадження технології в розглянутих умовах. **Висновки.** Запропонований підхід доповнює існуючі методи оцінки енергоефективності, надаючи судновласникам структурований інструмент для прийняття обґрунтованих рішень в умовах багатофакторної невизначеності.

Підкреслено, що SWOT-аналіз є ефективним засобом для оцінки операційних, економічних та екологічних ризиків, що повністю відповідає сучасним вимогам до управління в морському транспорті та може бути застосований для аналізу інших інноваційних технологій.

Ключові слова: енергоефективність, енергетична установка судна, заощадження пального, комплексний аналіз, мультимодальні перевезення.

OPTIMIZATION OF ENERGY EFFICIENCY AND RISK ASSESSMENT FOR ITS IMPLEMENTATION IN MARINE MULTIMODAL ECO-ORIENTED TRANSPORTATION

A.M. Ibrahim¹, K.M. Klevtsov²

¹ Ph.D., Department of transport technologies and ship repair,
Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0007-6007-5708

² D.Sc., Professor, Department of transport technologies and ship repair,
Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-8486-1104

Summary

Introduction. The article addresses the urgent issue of energy efficiency optimization in maritime multimodal transportation amidst current environmental and economic challenges. Facing stricter IMO emission requirements and rising fuel costs, shipowners need not only new technologies but also reliable tools to assess the risks of their implementation. The article focuses on a methodological approach to making well-founded managerial decisions. **Aims.** The article aims to substantiate the use of SWOT analysis as a methodological tool for the analytical assessment of risks and opportunities when implementing energy-saving technologies. The feasibility of using fuel additives is examined as a case study to test this method – a technologically accessible measure, the effectiveness of which, however, depends on many factors and requires a comprehensive pre-implementation analysis. **Results.** The article focuses on a practical decision-making tool – SWOT analysis. It is demonstrated that this method allows for a comprehensive assessment of the strengths and weaknesses of using fuel additives (e.g., fuel savings vs. additive costs), as well as external opportunities and threats (stricter environmental regulations vs. the emergence of low-quality products). To enhance objectivity, a quantitative interpretation of the analysis was performed, yielding an overall positive rating of 0.158, which indicates the viability of implementing the technology under the considered conditions. **Conclusions.** The proposed approach complements existing methods for assessing energy efficiency by providing shipowners with a structured tool for making informed decisions under conditions of multifactorial uncertainty. It has been proven that SWOT analysis is an effective means for evaluating operational, economic, and environmental risks, fully aligning with modern management requirements in maritime transport and applicable to the analysis of other innovative technologies.

Key words: energy efficiency; ship power plant; fuel saving; comprehensive analysis; multimodal transportation.

Вступ. Глобальні виклики сучасності, а саме зміна клімату, вичерпання природних ресурсів і коливання цін на енергоносії, усе більше спонукають світову спільноту до пошуку ефективних рішень у сфері енергозбереження та зменшення екологічного сліду. Масштаби сучасної економічної діяльності й обсяги міжнародних перевезень диктують необхідність постійного вдосконалення в напрямі підвищення енергоефективності та інтеграції еколого-орієнтованих підходів. Це не лише відповідає вимогам міжнародних регуляторів, а й відкриває нові перспективи для оптимізації логістичних ланцюгів та зниження операційних витрат. Перехід до більш сталого розвитку є комплексною задачею, що потребує системного аналізу та впровадження інноваційних технологій, які б забезпечували баланс між економічною доцільністю й екологічною відповідальністю.

Постановка проблеми. У сучасних умовах зростання вартості паливно-енергетичних ресурсів та необхідності зниження викидів парникових газів особливої актуальності набуває питання оптимізації енергоефективності морських вантажних перевезень. Головну роль регулятора тут відіграє Міжнародна морська організація (ІМО). Основні її вимоги регулюються Додатком VI Міжнародної конвенції щодо запобігання забрудненню з суден (MARPOL). Він постановляє підвищити свою енергоефективність у короткостроковій перспективі та, таким чином, зменшити свої викиди парникових газів. Адже, за даними ІМО, на морське судноплавство припадає близько 3 % цих викидів [1]. За прогнозами науковців, цей показник до 2050 року зросте до 17 %, якщо його не контролювати. Оскільки морський транспорт обслуговує 80–90 % світової торгівлі, вивчення питання використання енергії в судноплаванні є актуальним і лежить в основі пом'якшення змін клімату [2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. За результатами проведеного аналізу наукової літератури, присвяченої вивченню енергозбереження та зменшення викидів парникових газів (ПГ) на морському транспорті, розглянемо систематизований перелік заходів, котрі пропонуються дослідниками. Також проаналізуємо переваги та недоліки кожного з них.

Зниження швидкості суден, або так зване повільне плавання (Slow steaming), є одним із найбільш ефективних операційних підходів для скорочення споживання палива, а отже, викидів ПГ. Згідно з дослідженнями, зменшення швидкості на 1 вузол може знизити витрати пального до 25 %. Більшість суден при цьому працює з навантаженням двигуна в межах 50–65 %. Зниження швидкості дає змогу скоротити ефективну потужність на 52 %, що може зменшити щорічні викиди CO₂ на 22 кілотонни. Зменшення швидкості на 40 % забезпечує зниження викидів майже на 80 %. Оптимізація маршрутів та швидкості на основі моделей штучного інтелекту дає змогу визначити економічно вигідний режим руху, враховуючи тип і розмір судна [3].

Економічний ефект від впровадження повільного ходу зумовлений нелінійною залежністю опору судна від його швидкості. Зменшення швидкості призводить до пропорційно більшого зниження гідродинамічного опору корпусу, що прямо впливає на витрату енергії силової установки.

Однак поряд із перевагами слід враховувати й певні недоліки цього методу. Уповільнення ходу судна впливає на окупність інвестицій, оскільки зменшується

кількість рейсів, а збільшення кількості суден може нівелювати екологічний ефект. Також зменшення швидкості може негативно впливати на морехідні якості судна, зокрема на його остійність на курсі, що потрібно враховувати під час планування логістичних операцій [4; 5].

Модернізації енергетичної та силової установки судна. Аналіз досліджень говорить про значне скорочення викидів. Однак середнє очікуване скорочення для заходів, пов'язаних із силовою та руховою системами, є відносно низьким. Це відображає виклики та граничні умови, пов'язані з упровадженням цих заходів. Наприклад, справді інтегрована гібридна трансмісія значно відрізняється від традиційної установки. Виконання всіх умов, необхідних для оптимального впровадження та значного скорочення викидів, є складним завданням для такої ранньої стадії технології. Для деяких із більш звичайних заходів, як-от пристрої для підвищення ефективності, за останні десятиліття вже відбулися значні покращення, і, ймовірно, подальші вдосконалення залишаються незначними, оскільки наближаються фізичні обмеження [6].

Модернізація конструкції судна дає обмежений, але надійний ефект, який досягається завдяки підвищенню енергоефективності судна. Цей метод полягає в локальній модернізації корпусу і пропульсії. Вдалими прикладами можуть слугувати інноваційні цибулинні носові елементи або невеликі додатки корпусу (наприклад, статори попереднього завихрення, скеги, підводні кормові крила, система воріт руля). Часто такі модернізації є недорогими, з помірним потенціалом декарбонізації приблизно до 10 % скорочення викидів. Однак їх ефективність декарбонізації на одиницю інвестицій дуже висока.

Альтернативні джерела енергії. Найперспективнішими технологіями є ротори Флеттнера, вітрила-крила та буксирні повітряні змії. Вітрові турбіни вважаються неоптимальними через їх обмежену ефективність декарбонізації в розмірі 1–2 %. Ефективність роторів Флеттнера може досягати 20 %. Однак громадськість іноді сприймає ротори як неестетичні. Це обмежує їх застосування на деяких кораблях, наприклад моторних яхтах і круїзних лайнерах. У будь-якому випадку модернізація роторами Флеттнера і вітрилами-крилами потребує значного простору на палубі. Тому обидві технології підходять для балкерів, танкерів і генеральних вантажних суден [7].

Альтернативні види палива. Біопаливо, вироблене з відновлюваних органічних джерел, може знизити викиди CO₂ (до 20 %) і твердих частинок (до 50 % для сажі) без значної модифікації наявної інфраструктури. Однак його стабільність і логістика постачання є проблемними, а економічна ефективність у середньо- та довгостроковій перспективі є невизначеною порівняно з воднем та аміаком. Біодизель демонструє енергетичну щільність, порівнянну з дизельним паливом [8].

Водень є паливом з нульовими викидами у виробництві з відновлюваних джерел, проте характеризується низькою об'ємною енергетичною щільністю. Це зумовлює значні вимоги до об'єму зберігання: вчетверо більше, ніж MGO, вдвічі більше, ніж скраплений природний газ. Кріогенне зберігання та безпека є ключовими проблемами.

Аміак може використовуватися в існуючих двигунах та паливних елементах і має розвинену інфраструктуру транспортування та зберігання. Основними недоліками є його токсичність і негативний вплив на екосистеми.

Електроенергія, накопичена в акумуляторах, забезпечує нульові викиди та високу енергоефективність. Однак акумулятори мають значно нижчу масову й об'ємну енергетичну щільність порівняно з традиційними паливами, високі капітальні витрати та енергоємне виробництво.

Скrapлений природний газ (СПГ) може знизити викиди CO₂, але має нижчу об'ємну енергетичну щільність (на 40 % нижчу за дизельне паливо, третина об'єму паливної системи). Рідкий водень, аміак і метанол мають ще нижчу об'ємну енергетичну щільність порівняно із СПГ (на 40–50 %). Техніко-економічні дослідження в середньостроковій перспективі показують потенційну економічну вигідність біопалива, проте його довгострокова конкурентоздатність є сумнівною через обмеження постачання та волатильність цін [9].

Енергоефективність морських суден значною мірою залежить від зовнішніх факторів та експлуатаційних параметрів. Оптимізація маршруту й диференту судна є ключовими стратегіями для зниження споживання палива та викидів.

Оптимізація маршруту передбачає врахування гідрометеорологічних умов, зокрема швидкості й напрямку вітру та течії, а також висоти хвилі, які чинять значний вплив на опір судна. Статичні методи визначення оптимальної швидкості плавання є менш ефективними через мінливість цих факторів. Динамічні підходи, що використовують дані про навколишнє середовище в реальному часі для оптимізації швидкості, демонструють потенціал скорочення споживання палива та викидів парникових газів до 28 % в ідеальних умовах, перевищуючи ефективність статичної оптимізації приблизно на 2 %.

Оптимізація диференту судна полягає у виборі оптимального кута нахилу корпусу відносно поздовжньої осі з урахуванням поточної осадки. Ефективне диферентування залежить від умов завантаження, швидкості судна, а також зовнішніх факторів. Застосування оптимального диференту може забезпечити скорочення споживання палива до 14 % для існуючих суден за мінімальних витрат. Особливо за досягнення оптимального розподілу ваги без використання водяного баласту, оскільки збільшення водотоннажності призводить до зростання опору та витрати палива. Застосування комплексних підходів, що поєднують оптимізацію маршруту й диференту, є перспективним напрямом підвищення енергоефективності судноплавства та зниження його екологічного впливу [3].

Формулювання цілей статті. Метою цієї статті є обґрунтування й апробація методологічного підходу до аналітичної оцінки ризиків та можливостей, пов'язаних із впровадженням заходів з енергоефективності на морському транспорті. Для досягнення цієї мети пропонується використати SWOT-аналіз як інструмент для прийняття управлінських рішень, продемонструвавши його застосування на конкретному прикладі – оцінці доцільності використання суднових паливних присадок.

Виклад основного матеріалу. Для розуміння проблеми викидів дизельних двигунів насамперед потрібно розглянути їхні причини та механізми. На відміну від бензинових двигунів, основною екологічною складністю дизельних

агрегатів є виділення значної кількості оксидів азоту (NOx) та твердих частинок. Ці забруднювачі формуються внаслідок складного процесу згоряння паливно-повітряної суміші всередині циліндра. Нерівномірний розподіл палива та повітря, зумовлений високим тиском впорскування й обмеженим часом на їхнє ефективне змішування, відіграє ключову роль у цьому процесі.

Згоряння в дизельному двигуні проходить дві головні стадії: попередньо змішану та дифузійно контрольовану. На першому етапі, що охоплює невелику частку палива, запалювання відбувається одночасно в багатьох точках, де співвідношення палива й повітря є оптимальним. Друга стадія забезпечує згоряння решти палива, яке продовжує впорскуватися, випаровуватися та змішуватися з повітрям. Швидкість цього процесу визначається швидкістю дифузії палива в повітря.

Утворення NOx відбувається переважно в зонах високої температури та надлишку кисню, які характерні для стехіометричних або злегка збіднених сумішей. Викиди вуглеводнів є наслідком неповного згоряння палива в зонах із недостатньою кількістю повітря, гасіння полум'я поблизу холодних стінок циліндра, а також випаровування палива, що потрапило на мастильну плівку. Низький рівень викидів чадного газу (CO) в дизельних двигунах пояснюється загальною тенденцією до використання збіднених паливно-повітряних сумішей і наявністю достатньої кількості кисню для його подальшого окислення до вуглекислого газу (CO₂). Тверді частинки утворюються через неповне згоряння важких фракцій палива, особливо за значних навантажень та високих обертів двигуна, а також унаслідок часткового згоряння мастила та проблем з ефективністю системи впорскування палива [10].

У контексті глобальної стратегії з декарбонізації морського транспорту важливим етапом стало впровадження обов'язкових стандартів енергоефективності. Починаючи з 2013 року, Міжнародна морська організація (ІМО) поступово запроваджувала нормативи, відомі як індекс енергоефективності проектування (EEDI), який став основним критерієм для оцінки нових суден. Цей індекс був поетапно посилений відповідно до фаз регламенту, що дало змогу підвищити енергетичну ефективність судноплавства на міжнародному рівні. Так, згідно з Додатком 9 Резолюції Комітету із захисту морського середовища (MEPC) ІМО, індекс EEDI є мірою енергоефективності судна, дає змогу кількісно оцінити викиди CO₂ на кожен тону вантажу, переміщену на морську милю, і є обов'язковим критерієм для проектування нових суден. Нижче наведемо скорочену формулу розрахунку даного показника (1) [11]:

$$EEDI = \frac{\sum(P_i \cdot SFC_i \cdot CF_i)}{W \cdot V} \cdot f_j f_i f_v f_e, \quad (1)$$

де: W – вантажопідйомність судна, т;

V – швидкість судна, милі/годину;

P_i – потужність двигунів (головних або допоміжних), кВт. У розрахунках EEDI використовується 75 % від номінальної встановленої потужності (MCR) головного двигуна;

SFC_i – питома витрата палива відповідного двигуна, г/кВт·год);

CF_i – коефіцієнт перетворення (викиди CO_2 на 1 т палива);

f_j – поправочний коефіцієнт для специфіки конструкції судна (наприклад, криголами);

f_i – поправочний коефіцієнт для обмежень місткості;

f_v – поправка на зниження швидкості в реальних морських умовах (хвилі, вітер);

f_e – коефіцієнт наявності інноваційних енергозберігаючих технологій.

Формула може змінюватися залежно від типу судна та його силової установки (наприклад, для суден із дизель-електричною установкою або гібридною силовою установкою можуть застосовуватися інші методи розрахунку).

Отже, вище було проаналізовано багатообіцяючі альтернативні види палива та заходи, які в майбутньому можуть стати ключем до більш економічного й екологічного судноплавства. Проте поряд із цими напрямками існують і інші, не менш важливі підходи, котрі вже сьогодні можуть сприяти підвищенню енергоефективності та зменшенню впливу на довкілля. Одним із таких практичних і потенційно ефективних інструментів є використання присадок до традиційних видів палива.

Замість повного переходу до нової інфраструктури та технологій присадки дають можливість оптимізувати використання наявних ресурсів, покращуючи їхні характеристики та підвищуючи згоряння. Це, зі свого боку, може призвести до зниження витрат палива та шкідливих викидів. Таким чином, присадки виступають як ще один важливий елемент у загальній стратегії сталого розвитку морського транспорту, вивченню якого в попередніх джерелах було приділено недостатньо уваги.

Розглянемо детальніше механізми дії присадок для розуміння їх впливу на енергозбереження та зменшення викидів. Залежно від цього їх можна класифікувати за такими категоріями:

Присадки, котрі підвищують цетанове число. Цю категорію присадок розроблено для покращення займання дизельного пального. Ці засоби не тільки призводять до зростання цетанового числа, але й покращують змащення та знижують викиди NO_x . Останні розробки в галузі паливних присадок стосуються сполук на основі нітрогену та сукцинового ангідриду, що проявляють мультифункціональність, зокрема детергентні властивості. Експериментально підтверджено, що естери та пероксиди є ефективними агентами для підвищення цетанового числа; їхнє застосування навіть у низьких концентраціях істотно покращує ефективність процесу згоряння. Отже, інтеграція зазначених присадок сприяє оптимізації якісних характеристик пального, збільшенню експлуатаційного ресурсу двигуна та мінімізації негативного впливу на екосистему.

Альтернативні хімічні сполуки, включно з іншими алкільнітратами, ефірними нітратами, пероксидами й окремими нітрозосполуками, також демонструють потенціал як ефективні підсилювачі цетанового числа дизельного палива. Однак на цей час їхнє комерційне застосування є обмеженим. Важливо зазначити, що вплив цих менш поширених покращувачів цетанового числа на інші критично важливі експлуатаційні характеристики палива, зокрема термічну стабільність, залишається недостатньо дослідженим і потребує подальшого наукового вивчення.

Присадки, котрі виконують функцію очищення. У зоні паливних форсунок, яка піддається впливу високих температур у циліндрі двигуна, можливе утворення відкладень, що походять як із палива, так і з мастила. Інтенсивність цього процесу залежить від конструкції двигуна, характеристик палива та мастила, а також від умов його експлуатації. Надмірне накопичення відкладень здатне спотворити форму струменя палива, що впорскується (схему розпилення), що, зі свого боку, негативно впливає на ефективність змішування палива з повітрям. У деяких типах силових установок це може призвести до збільшення витрати палива та зростання рівня шкідливих викидів.

Для очищення паливних форсунок від існуючих відкладень або для підтримання їхньої чистоти на практиці застосовуються зазвичай беззольні полімерні мийні присадки. Механізм їхньої дії полягає у наявності полярної частини молекули, яка взаємодіє з відкладеннями та речовинами, що є їхніми попередниками, та неполярної частини, яка розчиняється в паливі. Завдяки такій будові присадка здатна розчинити вже утворені відкладення й запобігти формуванню нових. Типовий діапазон концентрацій мийних добавок у паливі становить від 50 до 300 частин на мільйон (ppm – parts per million).

Присадки, котрі є каталізаторами згоряння. Каталітичні присадки до палива є важливим інструментом для оптимізації процесу згоряння та мінімізації шкідливих викидів. Експериментальні дослідження демонструють, що застосування комерційно доступних каталізаторів може призвести до значного зниження викидів твердих частинок (на рівні понад 16 %) і монооксиду вуглецю (на рівні близько 10 %). Проте слід зазначити, що в деяких випадках можливе незначне збільшення концентрації оксидів азоту (NOx) у відпрацьованих газах. Застосування присадок до мазутів, що містять поверхнево-активні речовини та підсилювачі згоряння, дає змогу досягти ефективності згоряння, що перевищує 80 %. Окремі композиції, розроблені на основі благородних металів, забезпечують функціонування трикомпонентного каталізу, спрямованого на конверсію токсичних компонентів відпрацьованих газів в екологічно безпечні сполуки.

У ролі каталізаторів горіння використовуються деякі металоорганічні сполуки. Додавання цих сполук до палива може дійсно зменшити викиди чорного диму, які виникають унаслідок неповного згоряння. Такі переваги найбільш значні в разі використання зі старими технологічними двигунами та силовими установками, які є значними утворювачами диму.

Присадки, котрі покращують змащування. Ці присадки застосовуються для компенсації знижених мастильних характеристик дизельних палив, що пройшли глибоке гідроочищення. Їхня молекулярна структура має полярну функціональну групу, яка демонструє високу афінність до металевих поверхонь. Завдяки цьому присадки формують тонку адсорбційну плівку на поверхні металу, яка виконує функцію граничного мастильного шару за контакту двох металевих елементів. Тобто їх дія спрямована на покращення змащувальних характеристик палива, мінімізацію зношування компонентів двигуна та пролонгацію його експлуатаційного ресурсу.

Присадки, котрі виконують функцію антиоксидантів. Одним із механізмів деградації палива є окислення, ініційоване взаємодією розчиненого в паливі кисню з реакційноздатними сполуками.

Крім окислення, нестабільність палива може бути спричинена кислотно-лужними реакціями. Для запобігання цим реакціям зазвичай застосовуються стабілізатори, які є сильними основними амінами. Їхня типова концентрація варіюється від 50 до 150 ppm. Механізм їхньої дії полягає у взаємодії зі слабкими кислотними сполуками, що призводить до утворення продуктів, які залишаються розчиненими в паливі та не вступають у подальші небажані реакції [10; 12].

Отже, дослідження показують, що присадки до дизельного палива можуть мати значний вплив на характеристики двигуна та викиди.

Зменшення викидів: застосування певних присадок, зокрема на основі марганцю, продемонструвало здатність знижувати викиди шкідливих речовин, як-от оксиди вуглецю (CO) та вуглеводні (HC). Однак деякі дослідження виявили збільшення викидів оксидів азоту (NOx) в разі використання певних присадок.

Зниження питомої витрати палива: покращення процесу згоряння за допомогою присадок може призвести до зниження питомої витрати палива, що є важливим фактором для зменшення споживання пального та викидів. Металеві присадки й антиоксиданти показали позитивні результати в цьому напрямі.

Підвищення потужності та крутного моменту: деякі присадки, наприклад на основі марганцю, можуть сприяти підвищенню потужності та крутного моменту двигуна завдяки покращенню процесу згоряння. Важливо зазначити, що оптимальна концентрація присадки є критичною для досягнення позитивного ефекту.

Шумові та вібраційні ефекти: дослідження показують, що використання певних металовмісних присадок може призвести до зменшення вібрації та шуму двигуна.

Зменшення затримки запалювання: присадки можуть впливати на затримку запалювання, що є часом між впорскуванням палива та початком згоряння. Зменшення затримки запалювання може покращити процес згоряння.

Зменшення викидів диму та непрозорості: деякі присадки сприяють покращенню розпилення палива та випаровування, що може призвести до зниження викидів диму й непрозорості [13].

Аналіз наявних даних і принципів функціонування присадок до палива свідчить про те, що оптимальний вибір присадки та її ефективна концентрація для конкретного виду палива не піддаються апріорному прогнозуванню. У силу складної взаємодії між хімічним складом базового палива, специфічними характеристиками двигуна й умовами його експлуатації універсальне рішення в цій сфері відсутнє.

Визначення найбільш дієвої присадки та її оптимального дозування є емпіричним завданням, що потребує проведення ретельних експериментальних досліджень на конкретній силовій установці судна. Ці дослідження повинні охоплювати всебічне оцінювання впливу різних типів присадок у широкому діапазоні концентрацій на ключові експлуатаційні параметри, як-от ефективність згоряння, рівень викидів шкідливих речовин, термічна стабільність палива та довговічність компонентів паливної системи. Лише на основі систематично отриманих експериментальних даних можна ідентифікувати найбільш ефективне рішення, що забезпечує оптимальні техніко-економічні й екологічні показники для конкретної комбінації палива та конкретної дизельної силової установки.

Найкраще цей факт демонструють практичні дослідження українських науковців Сагіна С. В., Заблоцького Ю. В., Сагіна А. С. [14]. Вони підтверджують, що наразі немає універсальних або чітко визначених рекомендацій щодо оптимальної концентрації паливних присадок у дизельному паливі. Як зазначено в проведених ними дослідженнях, навіть фірми-виробники присадок обмежуються вказівкою можливого діапазону концентрацій, залишаючи конкретний вибір кінцевому користувачу. Це пов'язано з великою кількістю змінних факторів: конструктивними особливостями двигунів, характеристиками базового палива, умовами експлуатації, режимами навантаження тощо.

Оптимальну концентрацію присадки потрібно визначати експериментальним шляхом для кожного конкретного випадку. Такий підхід дає змогу врахувати специфіку роботи суднових дизельних двигунів і забезпечити досягнення мінімальної питомої витрати палива, що безпосередньо впливає на економічність експлуатації.

Виходячи з вищевикладеного, вважаємо доцільним підкреслити, що оцінка результативності присадок не повинна обмежуватися суто кількісними вимірюваннями технічних параметрів. Хоча експериментальні дослідження є критично важливими для визначення оптимальних концентрацій та впливу на викиди й ефективність, повне розуміння доцільності застосування присадок потребує врахування ширшого спектра факторів. Тому нами пропонується використати метод якісного аналізу, а саме SWOT-аналіз, котрий дає змогу комплексно оцінити сильні та слабкі сторони застосування присадки, а також можливості й загрози, пов'язані з її впровадженням.

SWOT-аналіз – це методологічний інструмент стратегічного планування, призначений для системного аналізу внутрішніх і зовнішніх факторів, що впливають на об'єкт дослідження. Він передбачає ідентифікацію та структурування Strengths (сильних сторін), Weaknesses (слабких сторін), Opportunities (можливостей) та Threats (загроз). Сильні та слабкі сторони є внутрішніми атрибутами об'єкта, що піддаються контролю та можуть бути змінені. Можливості та загрози, навпаки, є зовнішніми факторами, що знаходяться поза контролем об'єкта, але здатні впливати на його розвиток і ефективність. Результати SWOT-аналізу використовуються для розробки стратегій, спрямованих на максимізацію сильних сторін і можливостей, а також мінімізацію слабких сторін та загроз. Цей метод забезпечує комплексну оцінку ситуації, сприяючи прийняттю обґрунтованих управлінських рішень.

На відміну від суто кількісного підходу, SWOT-аналіз дає змогу:

1) розглянути проблему багатовимірно – крім технічних переваг (наприклад, зниження витрати палива), він враховує економічні аспекти (вартість присадки, вплив на експлуатаційні витрати), екологічні наслідки (вплив виробництва й утилізації присадки), а також соціальні та регуляторні чинники;

2) виявити неочевидні зв'язки – SWOT-аналіз може виявити можливості для оптимізації застосування присадки (наприклад, синергія з іншими заходами енергозбереження) або потенційні загрози (наприклад, ризики, пов'язані з використанням неякісних присадок), які не завжди очевидні під час кількісного аналізу;

3) систематизувати інформацію для прийняття рішень – SWOT-аналіз надає структуровану рамку для організації та аналізу різнорідних даних, що полегшує процес прийняття обґрунтованих рішень щодо доцільності використання присадки в конкретних умовах експлуатації судна;

4) врахувати специфіку контексту – застосування SWOT-аналізу дає змогу адаптувати оцінку результативності присадки до конкретних потреб та цілей судноплавної компанії, враховуючи її флот, операційні маршрути, екологічну політику й економічні пріоритети.

Таким чином, поєднання кількісних експериментальних даних з якісним аналізом за допомогою SWOT-аналізу забезпечує більш глибоке та всебічне розуміння впливу присадок на ефективність та сталість судноплавства, сприяючи прийняттю оптимальних рішень і подальшому розвитку досліджень у цій важливій галузі. Слід підкреслити, що застосування запропонованого аналізу розглядається як додатковий методологічний підхід до оцінки енергоефективності. Він забезпечує можливість доцільності здійснення якісного аналізу, враховуючи комплекс індивідуальних параметрів, зокрема характеристики палива, присадок, силових установок, умов експлуатації та інші релевантні змінні. Таким чином, цей інструмент аналізу є, на нашу думку, ефективним для прийняття рішень в умовах багатофакторної комплексності.

У таблиці 1 наведено приклад застосування SWOT-аналізу для прийняття рішення щодо використання присадок (або їх певного виду) для суднового дизельного палива. Слід зазначити, що перелік позицій у кожному блоці не є вичерпним і кожна судноплавна компанія може ідентифікувати власні сильні та слабкі сторони. Отже, рішення щодо оптимального вибору приймаються на основі їхніх індивідуальних експлуатаційних умов. Для кожної компанії будуть визначені свої індивідуальні переваги та недоліки застосування добавок.

Проведений якісний аналіз дає змогу окреслити основні переваги, недоліки, можливості та загрози впровадження паливних присадок у суднову енергетичну систему. Водночас для підвищення об'єктивності та забезпечення можливості порівняльної оцінки ефективності запропонованого рішення доцільно перейти до кількісної інтерпретації результатів SWOT-аналізу.

Із цією метою можна використати чисельну матрицю, де кожному фактору присвоюється вага (σ_i) – його відносна важливість, та оцінка впливу (q_i) – ступінь його позитивного або негативного ефекту. Орієнтовний приклад кількісної інтерпретації даного аналізу наведено в таблиці 2.

Для чіткої візуалізації вихідних та отриманих розрахункових даних, можна розглянути рис. 1.

Підбивши підсумок SWOT-аналізу з діаграми робимо висновок: сума позитивних коефіцієнтів – 0,417; сума негативних коефіцієнтів – 0,259; загальний SWOT-рейтинг – 0,158. Загальне значення > 0 свідчить про загальну доцільність впровадження технології. Загальну ефективність можна визначити таким чином (формула 2):

$$SWOT_{\text{аналіз}} = \sum \sigma_i \cdot q_i \quad (2)$$

Таблиця 1

**SWOT-аналіз: фактори впливу на рішення
щодо використання присадок у судновому паливі**

Сильні сторони (Strengths)	Слабкі сторони (Weaknesses)
<ol style="list-style-type: none"> 1. Потенційне зниження витрати палива (до X%). 2. Можливе зменшення викидів шкідливих речовин (CO, HC, PM). 3. Покращення експлуатаційних характеристик двигуна (потужність, прийомистість). 4. Збільшення терміну служби двигуна та паливної системи (завдяки зменшенню відкладень та зносу). 5. Відносна простота впровадження порівняно з модернізацією або переходом на альтернативне паливо. 6. Оптимізація використання наявного палива й інфраструктури. 7. Зменшення зносу деталей паливної системи. 8. Покращення низькотемпературних властивостей палива. 9. Зниження шумності роботи двигуна 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Вартість присадок та вплив на загальні експлуатаційні витрати. 2. Неоднозначність результатів залежно від типу двигуна, палива та умов експлуатації. 3. Ризики використання неякісних або несумісних присадок (пошкодження двигуна). 4. Необхідність ретельного вибору присадок, що відповідають вимогам виробника. 5. Можливі екологічні наслідки виробництва й утилізації присадок. 6. Потреба в експериментальних дослідженнях для визначення оптимальної присадки та дозування. 7. Складність контролю якості та ефективності присадок. 8. Обмеженість інформації про довгострокові наслідки використання. 9. Потенційні проблеми із сумісністю з різними типами ущільнень і матеріалів
Можливості (Opportunities)	Загрози (Threats)
<ol style="list-style-type: none"> 1. Посилення екологічних норм і вимог ІМО. 2. Підвищення вартості традиційних видів палива. 3. Розвиток нових, більш ефективних та екологічно чистих присадок. 4. Можливість синергії з іншими заходами енергозбереження (наприклад, оптимізація маршруту). 5. Збільшення попиту на екологічно чисті судна та перевезення. 6. Розширення ринку присадок завдяки зростанню екологічної свідомості. 7. Вартість використання присадок може бути нижчою за вартість модифікації силової установки судна з метою енергозбереження. 8. Можливість отримання податкових пільг або субсидій за використання екологічно чистих технологій 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Зростання цін на присадки. 2. Розробка та впровадження альтернативних технологій та видів палива. 3. Недостатня обізнаність судновласників про переваги присадок. 4. Поява на ринку неякісної продукції. 5. Обмеженість досліджень щодо довгострокових ефектів використання присадок. 6. Регуляторні обмеження на використання певних типів присадок (наприклад, металовмісних). 7. Опір змінам з боку консервативних судновласників. 8. Ризик непередбачених побічних ефектів від використання нових присадок

Висновки та перспективи подальших досліджень у цій галузі. На основі проведеного дослідження можна зробити такі висновки.

1. Прийняття рішень щодо оптимізації енергоефективності на морському транспорті є складною багатофакторною задачею, що потребує не лише техніко-економічних розрахунків, а й комплексного аналізу супутніх ризиків і можливостей. Існуючі методи, а саме уповільнення суден, модернізація обладнання чи перехід на альтернативне паливо, мають значний потенціал, але пов'язані з високими інвестиціями й операційними ризиками.

Таблиця 2

Приклад кількісної оцінки SWOT-аналізу
ефективності використання паливних присадок

Категорія	Фактор	Вага (σ_i)	Оцінка (q_i)	Добуток ($\sigma_i \times q_i$)
V	Зменшення витрати пального (до 4,7 %)	0,15	0,9	0,135
D	Покращення роботи двигуна та зниження викидів	0,10	0,8	0,080
M	Відсутність потреби в дорогій модернізації	0,08	0,7	0,056
W	Неоднозначність результатів залежно від умов	0,12	-0,6	-0,072
S	Вартість присадок	0,10	-0,5	-0,050
R	Ризик несумісності з матеріалами двигуна	0,08	-0,4	-0,032
P	Посилення екологічних стандартів IMO	0,10	0,9	0,090
Z	Синергія з іншими заходами енергозбереження	0,08	0,7	0,056
T	Розвиток альтернативних технологій	0,10	-0,6	-0,060
Y	Ризик появи неякісної продукції на ринку	0,09	-0,5	-0,045

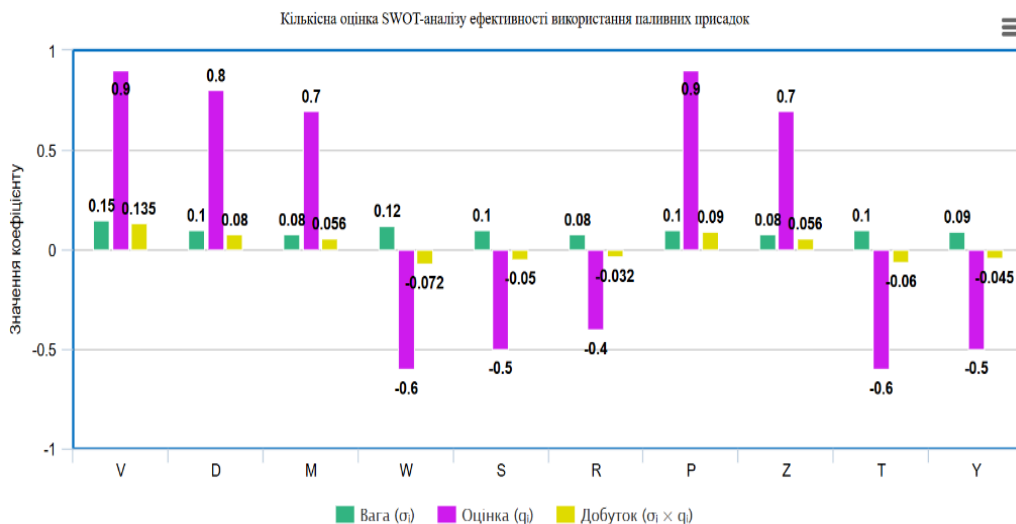


Рис. 1. Приклад кількісної інтерпретації оцінки SWOT-аналізу ефективності використання паливних присадок

2. У статті було запропоновано й апробовано методологічний підхід, що базується на SWOT-аналізі, як ефективний інструмент для аналітичної оцінки доцільності впровадження конкретних енергоефективних технологій. Цей метод дає змогу систематизувати внутрішні (сильні та слабкі сторони) та зовнішні (можливості й загрози) фактори, що є ключовим елементом управління ризиками.

3. На прикладі застосування паливних присадок було продемонстровано, що SWOT-аналіз забезпечує не тільки якісну, але й кількісну оцінку. Проведений розрахунок показав, що сума позитивних факторів (0,417) перевищує суму негативних (-0,259), а загальний SWOT-рейтинг становить 0,158. Позитивне значення рейтингу свідчить про обґрунтованість упровадження цієї технології в конкретних умовах, надаючи судновласнику формалізовану основу для прийняття рішення.

4. Таким чином, головним висновком роботи є не стільки підтвердження ефективності присадок, скільки демонстрація SWOT-аналізу як дієвого аналітичного інструменту для оцінки ризиків у сфері енергоефективності морських перевезень. Цей підхід може бути екстрапольований на оцінку інших технологій і заходів, що робить його універсальним.

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні застосування цієї методології для порівняльного аналізу різних енергоефективних рішень (наприклад, присадки та slow steaming або модернізація корпусу судна та встановлення роторів Флеттнера) для різних типів суден та операційних маршрутів, що дасть змогу розробити комплексні стратегії управління ризиками в морських мультимодальних перевезеннях.

ЛІТЕРАТУРА

1. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL). Режим доступу: URL: [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx) (дата звернення: 25.07.2025).
2. Schnurr R.E.J., Walker T.R. Marine Transportation and Energy Use. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.09270-8> (дата звернення: 25.07.2025).
3. Tadros M., Ventura M., Soares C. G. Review of current regulations, available technologies, and future trends in the green shipping industry. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 280. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114670> (дата звернення: 25.07.2025).
4. Barreiro J., Zaragoza S., Diaz-Casas V. Review of ship energy efficiency. *Ocean engineering*. 2022. Vol. 257. 111594. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111594> (дата звернення: 25.07.2025).
5. Benefits of slow steaming in realistic sailing conditions along different sailing routes / A. Farkas et al. *Ocean engineering*. 2023. Vol. 275. 114143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114143> (дата звернення: 25.07.2025).
6. Bouman E.A. et al. State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. *Transportation research part D: transport and environment*. 2017. Vol. 52. P. 408–421. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.022> (дата звернення: 25.07.2025).
7. Kondratenko A.A. et al. Existing technologies and scientific advancements to decarbonize shipping by retrofitting. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2025. Vol. 212. 115430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115430> (дата звернення: 25.07.2025).
8. Manikandan S., Vickram S., Devarajan Y. Cutting-edge technologies: biofuel innovations in marine propulsion systems to lower black carbon emissions. *Results in engineering*. 2025. Vol. 25. 104095. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104095> (дата звернення: 25.07.2025).

9. Issa M., Ilinca A., Martini F. Ship energy efficiency and maritime sector initiatives to reduce carbon emissions. *Energies*. 2022. Vol. 15. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15217910> (дата звернення: 25.07.2025).
10. Daud S., Hamidi M.A., Mamat R. A review of fuel additives' effects and predictions on internal combustion engine performance and emissions. *AIMS energy*. 2022. Vol. 10 (1). P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.3934/energy.2022001> (дата звернення: 25.07.2025).
11. Annex 9 resolution мерс.364 (79): 2022 Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships. Режим доступу: URL: [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364\(79\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364(79).pdf) (дата звернення: 25.07.2025).
12. Elkelay M., Aly Farag M., Seleem H.E. Enhancing Diesel Engine Power Plant Efficiency and Cutting Emissions with Commercial Fuel Additives in Generator Systems. *Pharos Engineering Science Journal*. 2025. Vol. 2 (1). P. 37–46. DOI: <https://doi.org/10.21608/pej.2025.352985.1012> (дата звернення: 25.07.2025).
13. Cline C., Micklow G. Compilation of Conventional Fuel Additives. A literature review of chemical additives in diesel and biodiesel fuels for improved combustion. *Journal of multidisciplinary engineering science and technology (JMEST)*. 2020. Vol. 7, Issue 5. P. 11791–11807. Режим доступу: URL: https://www.researchgate.net/publication/341623214_A_Compilation_of_Conventional_Fuel_Additives_A_literature_review_of_chemical_additives_in_diesel_and_biodiesel_fuels_for_improved_combustion (дата звернення: 25.07.2025).
14. Сагін С. В., Заблоцький Ю. В., Сагін А. С. Підвищення економічності роботи судових середньообертових дизелів. *Водний транспорт*. 2025. № 1 (42). DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20> (дата звернення: 25.07.2025).

REFERENCES

1. International convention for the prevention of pollution from ships (MARPOL) (n.d.). International Maritime Organization. [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx).
2. Schnurr, R.E.J., & Walker, T.R. (2019). Marine transportation and energy use. *Reference module in earth systems and environmental sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.09270-8>.
3. Tadros, M., Ventura, M., & Soares, C.G. (2023). Review of current regulations, available technologies, and future trends in the green shipping industry. *Ocean Engineering*, 280, 114670. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114670>.
4. Barreiro, J., Zaragoza, S., & Diaz-Casas, V. (2022). Review of ship energy efficiency. *Ocean Engineering*, 257, 111594. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111594>.
5. Farkas, A., Degiuli, N., Martić, I., & Mikulić, A. (2023). Benefits of slow steaming in realistic sailing conditions along different sailing

- routes. *Ocean Engineering*, 275, 114143. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114143>.
6. Bouman, E.A., Lindstad, E., Riialand, A.I., & Strømman, A.H. (2017). State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 408–421. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.022>.
 7. Kondratenko, A.A., Zhang, M., Tavakoli, S., Altarriba, E., & Hirdaris, S. (2025). Existing technologies and scientific advancements to decarbonize shipping by retrofitting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 212, 115430. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115430>.
 8. Manikandan, S., Vickram, S., & Devarajan, Y. (2025b). Cutting-edge technologies: Biofuel innovations in marine propulsion systems to lower black carbon emissions. *Results in Engineering*, 25, 104095. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104095>.
 9. Issa, M., Ilinca, A., & Martini, F. (2022). Ship energy efficiency and maritime sector initiatives to reduce carbon emissions. *Energies*, 15 (21), 7910. <https://doi.org/10.3390/en15217910>.
 10. Daud, S., Hamidi, M.A., & Mamat, R. (2022). A review of fuel additives' effects and predictions on internal combustion engine performance and emissions. *AIMS Energy*, 10 (1), 1–22. <https://doi.org/10.3934/energy.2022001>.
 11. Annex 9 resolution mepc.364(79), 2022 Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships (n.d.). [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364\(79\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364(79).pdf).
 12. Elkelawy, M., Aly Farag, M., & Seleem, H.E. (2025). Enhancing diesel engine power plant efficiency and cutting emissions with commercial fuel additives in generator systems. *Pharos Engineering Science Journal*, 2 (1), 37–46. <https://doi.org/10.21608/pesj.2025.352985.1012>.
 13. Cline C., Micklow G. (2020) A Compilation of Conventional Fuel Additives. A literature review of chemical additives in diesel and biodiesel fuels for improved combustion. *Journal of multidisciplinary engineering science and technology (JMEST)*, 7 (5), 11791–11807. URL: https://www.researchgate.net/publication/341623214_A_Compilation_of_Conventional_Fuel_Additives_A_literature_review_of_chemical_additives_in_diesel_and_biodiesel_fuels_for_improved_combustion.
 14. Sagin, S.V., Zablotskyi, Yu.V., & Sagin, A.S. (2025). Pidvyshchennia ekonomichnosti roboty sudnovykh serednoobertovykh dyzeliv [Improving the efficiency of medium-speed marine diesel engines *Vodnij Transport*, 1 (42), 166–179. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20>.

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації: 30.10.2025

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ З ВИЗНАЧЕННЯ ДАЛЬНОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗВУКУ В ШЕЛЬФОВІЙ ЗОНІ ЧОРНОГО МОРЯ

М.Б. Капочкіна¹, Н.В. Кучеренко²

¹ канд. техн. наук, доцент кафедри «Навігація і керування судном»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0009-0009-9461-1411

² канд. географ. наук, провідний науковий співробітник Науково-дослідного центру
Збройних Сил України «Державний океанаріум»,
Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-9770-3284

Анотація

Дальність розповсюдження звуку в океанах і морях є найважливішою гідроакустичною характеристикою, від якої залежить ефективність шумопеленгації, гідролокації, щільність мережевих гідроакустичних систем інформаційного шару (позиціонування та зв'язок) автоматизованої системи ідентифікації суден. Розглянуто два методологічних (теоретичних) аспекти визначення дальності розповсюдження звуку. Перший аспект – це визначення дальності звуку, як функції, що залежить від частоти акустичної хвилі. Другий – визначення дальності розповсюдження акустичних хвиль різних довжин, як константи кількості циклів (довжин хвиль). Для умов мілководдя, дальність розповсюдження акустичних хвиль додатково підпадає під суттєву залежність від таких гідроакустичних характеристик ґрунтів, як кількісні показники відбиття та поглинання звуку, а також від показника розсіяння звуку морською поверхнею. Отримання оцінки дальності розповсюдження звуку на мілководді має виключно експериментальне вирішення. Для глибин 10–20 м така оцінка була отримана. На глибинах більше 50 м, де може існувати підводний звуковий канал, дальність розповсюдження акустичних хвиль може бути визначена теоретичними методами. В роботі наведено результати експериментального визначення дальності розповсюдження звуку на глибинах від 20 м до глибин можливого формування хвилеводу. Експеримент було виконано для герцевого діапазону частот, який відповідно теорії дальності розповсюдження акустичних хвиль різних довжин, як константи кількості циклів (довжин хвиль), забезпечує максимальну дальність звукопідводного зв'язку, гідролокації та шумопеленгації. Обробка даних гідроакустичного експерименту з визначення дальності розповсюдження звуку передбачає урахування рефракції акустичних хвиль, що формує зони акустичної тіні. Для визначення дальності розповсюдження звуку запропоновано визначати акустичну сигнатуру (амплітудний спектр), осереднену за певний час, з подальшим виявленням амплітуд тестових частот, як показників інтенсивності акустичного сигналу.

Ключові слова: гідроакустика, автоматизовані системи ідентифікації суден, поглинання звуку, дальність розповсюдження звуку, морська навігація, донна гідроакустична інфраструктура, безпека судноплавства.

**RESULTS OF AN EXPERIMENT TO DETERMINE THE RANGE OF SOUND
PROPAGATION IN THE SHELF ZONE OF THE BLACK SEA**

M.B. Kapochkina¹, N.V. Kucherenko²

¹ candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of “Navigation and Ship Management”,

Odessa National Maritime University,

ORCID ID: 0009-0009-9461-1411

² candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher of the Naval Research Center of the Armed Forces of Ukraine “State Oceanarium”,

National University “Odesa Maritime Academy”

ORCID ID: 0000-0002-9770-3284

Summary

The sound propagation range in the oceans and seas is the most important hydroacoustic characteristic, on which the efficiency of noise-scattering, sonar, density of network hydroacoustic systems of the information layer (positioning and communication) of the automated ship identification system depends. Two methodological (theoretical) aspects of determining the sound propagation range are considered. The first aspect is the determination of the sound propagation range as a function that depends on the frequency of the acoustic wave. The second is the determination of the propagation range of acoustic waves of different lengths as a constant of the number of cycles (wavelengths). For shallow water conditions, the propagation range of acoustic waves is additionally subject to significant dependence on such hydroacoustic characteristics of soils as quantitative indicators of sound reflection and absorption, as well as on the indicator of sound scattering by the sea surface. Obtaining an estimate of the sound propagation range in shallow water has an exclusively experimental solution. For depths of 10–20 m, such an estimate was obtained. At depths of more than 50 m, where an underwater sound channel may exist, the propagation range of acoustic waves can be determined by theoretical methods. The paper presents the results of experimental determination of the propagation range of sound at depths from 20 m to the depths of possible formation of a waveguide. The experiment was performed for the hertz frequency range, which, according to the theory of the propagation range of acoustic waves of different lengths, as a constant of the number of cycles (wavelengths), provides the maximum range of underwater sound communication, sonar and noise direction finding. Data processing of the hydroacoustic experiment to determine the propagation range of sound involves taking into account the refraction of acoustic waves, which forms acoustic shadow zones. To determine the propagation range of sound, it is proposed to determine the acoustic signature (amplitude spectrum), averaged over a certain time, with subsequent detection of the amplitudes of test frequencies as indicators of the intensity of the acoustic signal.

Key words: *hydroacoustics, automated vessel identification systems, sound absorption, sound propagation range, maritime navigation, bottom hydroacoustic infrastructure, shipping safety.*

Постановка проблеми. Актуальність дослідження акустичних характеристик води шельфових зон пов’язана з перспективою розгортання донної

інфраструктури з гідроакустичних засобів спостереження. Щільність зазначених систем обумовлена дальністю розповсюдження звуку у воді. На відміну від глибоководних районів, де за наявності хвильоводу дальність розповсюдження звуку може досягати сотень кілометрів, у мілководній шельфовій зоні дальність розповсюдження звуку вимірюється кілометрами. У районах мілководдя дальність розповсюдження звуку у воді залежить від глибини, типу рефракції акустичних хвиль, акустичних властивостей донних відкладень, стану морської поверхні тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Удосконалення методик отримання чисельних оцінок дальності розповсюдження звуку потребує насамперед визначення сучасного стану розрахункових та експериментальних технологій отримання даних про дальність розповсюдження звуку у воді. Базові положення гідроакустики викладені в роботі [1]. Важливі питання акустики мілкого моря розглянуті в монографії [2]. Один із варіантів розрахунку коефіцієнта поглинання звуку у воді, як функції частоти релаксації, частоти гідролокації, тиску (глибини), температури, солоності та концентрації у воді іонів водню, наведений у роботі [3]. Проаналізуємо формулу розрахунку коефіцієнта поглинання звуку у воді

$$\alpha = 0.106 \frac{f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} e^{(pH-8)/0.56} + 0.52 \left(1 + \frac{T}{43} \right) \left(\frac{S}{35} \right) \frac{f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} e^{-D/6} + 0.00049 f^2 e^{-(T/27+D/17)}, \quad (1)$$

де: f – частота гідролокації;

f_1 – частота релаксації;

D – глибина;

T – температура води;

S – солоність води;

pH – від’ємний логарифм концентрації іонів водню у воді.

Зазначена формула є емпіричною за типом, тому (за визначенням) не обов’язково повинна бути фізично обґрунтованою. За законами фізики затування звуку в рідині пропорційне показникам її зсувної та об’ємної в’язкості. Можна побачити, що коефіцієнт динамічної в’язкості, на жаль, не входить у формулу (1). Водночас слід зазначити, що наявність у формулі (1) температури в показнику ступеня не є фізично обґрунтованою, також не мають строгого фізичного обґрунтування такі параметри, як глибина, солоність і особливо концентрація іонів водню у воді. Фізична необґрунтованість зазначених аргументів функції коефіцієнту поглинання звуку у воді опосередковано підтверджується в роботах [4; 5], де вказано, що для певного діапазону частот (до 100 кГц), коефіцієнт затування звуку можна розрахувати лише як функцію частоти звуку:

$$\beta = 0.036 \cdot f^{3/2} \quad (2)$$

де: β – коефіцієнт затування, дБ/км;

f – частота, кГц.

Тобто навіть застосування частоти релаксації на практиці не є необхідним. Слід зазначити, що в гідроакустичному програмному забезпеченні розрахунки енергетичної дальності звукопідводного зв’язку, гідролокації,

шумопеленгації визначаються за вхідними параметрами: частота звукової хвилі, тривалість імпульсу, амплітуда сигналу та коефіцієнт затухання звуку [6]. Таким чином, можна клонстатувати невідповідність теорії затухання звуку практиці розрахунків.

У роботі [3] вказано, що для глибоководних районів на частотах до 100 Гц поглинання звуку, виміряне експериментально, становить 0,00015 дБ/км, а для мілководних районів – 0,002 дБ/км. Проблема збільшення ефекту затухання звуку на мілководді детально розглядається в роботі [4]. У мілководних районах, де формування хвилеводу є малоймовірним, дальність розповсюдження звуку додатково зменшується залежно від акустичних властивостей донних відкладень, стану водної поверхні тощо. Відповідно до [7], після контакту акустичної хвилі з морською поверхнею втрачається приблизно 8 % акустичної енергії, а після контакту фронту акустичної хвилі з дном – 10 % акустичної енергії. Таким чином, чим більша глибина, тим менша кількість контактів акустичної хвилі з морським дном і морською поверхнею, що приводить до менших витрат акустичної енергії. Втрати акустичної енергії від контакту з морською поверхнею можуть поліпшуватися в умовах штільових умов. Аналогічні втрати від контакту з донними відкладеннями для кожного району є незмінними, тому будь-яка акваторія може бути зонованою за цим акустичним критерієм [8].

За нашими оцінками, площа шельфу північно-західної частини Чорного моря з глибинами, що перевищують 20 метрів, де експериментально ще не була визначена дальність дії гідролокаторів, шумопеленгаторів, систем ретрансляції гідроакустичного зв'язку та систем підводного позиціонування, становить приблизно 19 тис. км². Тому нами була поставлена задача визначення дальності розповсюдження акустичних хвиль у шельфовій зоні Чорного моря з глибинами понад 20 м. Слід зазначити, що акустичні характеристики донних відкладень на глибинах 15–20 м, де в поверхневому шарі превалюють алевритові піски, відрізняються від акустичних характеристик мулових відкладень поверхневого шару, які зустрічаються на глибинах понад 30 м. Крім того, слід враховувати не тільки коефіцієнт поглинання звуку, а й коефіцієнт відбиття звукової хвилі від донних відкладень різного типу [9].

На рисунку 1 наведено експериментальні дані визначення коефіцієнта затухання звуку різної частоти в центральній частині Балтійського моря [10].

На рисунку 1 наведено значення коефіцієнта загасання звуку в діапазоні частот 100–5000 Гц, отримані у травні (зачорнені кружки), вересні (показані квадратами) і серпні (зачорнені трикутники). Треба зазначити, що для вересневих умов на частоті 100 Гц коефіцієнт поглинання був 0,08 дБ/км і зменшувався до 0,018 дБ/км на частоті 600 Гц. Зі збільшенням частоти до 1,2 кГц коефіцієнт поглинання збільшився до 0,14 дБ/км з подальшим зменшенням коефіцієнта поглинання до 0,13 дБ/км на частоті 2 кГц. Таким чином, аналіз даних, отриманих із використанням вибухових джерел звуку із застосуванням тональних джерел звуку [10], свідчить про те, що для акустичного сигналу в частотному діапазоні від 100–600 кГц коефіцієнт поглинання звуку зменшувався з підвищенням частоти, що не передбачено формулами (1, 2).

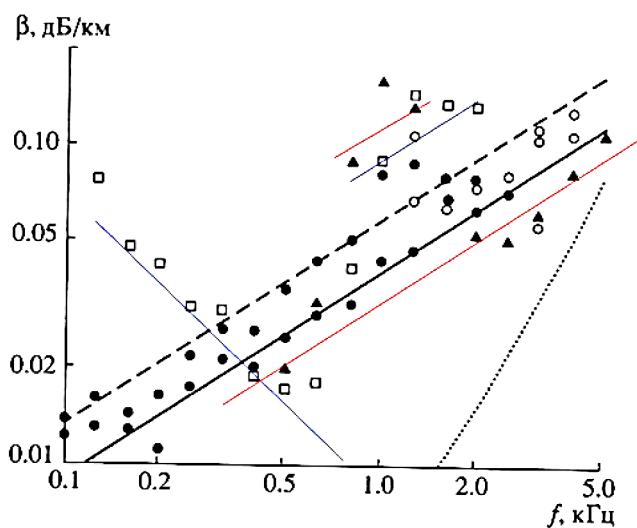


Рис. 1. Експериментальні дані з затухання звуку в центральній частині Балтійського моря з авторськими доробками (виділено кольором) [10]

Виявлення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття. Результати гідроакустичних досліджень у Чорноморському регіоні опубліковані в роботах [4; 11; 12; 13; 14]. Для шельфу коефіцієнт поглинання звуку за емпіричними формулами оцінюється в діапазоні від 0,002 до 0,012 дБ/км. У роботі [4] розглядається питання розповсюдження звуку у хвилеводі, де втрат енергії звуку завдяки відбиттю від морського дна не відбувається. На частотах 0,5–5,0 кГц дальність розповсюдження акустичного сигналу становить: з квітня до серпня – 40 км, з вересня до листопада – до 120 км, з грудня до березня – до 200 км. Той самий колектив авторів у роботах [11; 12] для району з глибинами від 15 до 18,5 м експериментальним шляхом, в умовах зимового періоду, коли звук розповсюджується підповерхневим хвилеводом, показав дальність не 200 км, а в 10 разів меншу. За умов відсутності хвилеводу автори [11; 12] експериментальним шляхом оцінили дальність розповсюдження звуку не 40–120 км, а лише 2–3 км, тобто вже в десятки разів меншу.

У дослідженні використані дані міжгалузевого гідроакустичного експерименту, виконаного за методикою авторів дослідження сертифікованими засобами гідроакустичного висвітлення підводної обстановки й переданими НДЦ ЗСУ «Державний океанаріум» для визначення оцінки дальності розповсюдження звуку. Експеримент виконано в шельфовій зоні Чорного моря на глибині 50 м в осінній період року.

Формулювання цілей статті. Визначення дальності розповсюдження звуку в реальних умовах рефракції акустичних хвиль (викривлення акустичних променів) ускладнено негативним впливом зон акустичної тіні. У роботі розглядається спрощений (променевий) варіант оцінки умов звукового «опромінення» водного середовища. Променева методика обробка експериментальних даних, отриманих в умовах наявності зон акустичної тіні як зон низької просторової щільності акустичних променів, досі не запропонована. Експериментальне визначення дальності

дії гідроакустичних засобів моніторингу / спостереження в підводних системах у мілководних районах повинно містити розрахунок траєкторій розповсюдження акустичних променів. Важливо враховувати, що розрахунок траєкторій акустичних променів завдяки відсутності дисперсії звуку у воді є уніфікованим у всьому частотному діапазоні, тобто не залежить від частоти акустичного сигналу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо головні принципи обробки даних акустичних вимірювань дальності розповсюдження звуку вздовж акустичної траси. Гідроакустичними дослідженнями вздовж акустичних трас займалися автори робіт [15; 16; 17; 18]. Нами в експерименті з вимірювання дальності розповсюдження звуку було задіяне судно як платформа штучного джерела акустичних сигналів із частотою 80 Гц та чотири засоби шумопеленгації. Засоби шумопеленгації були встановлені вздовж акустичної траси з дискретністю 4 км. У процесі руху судна засобами шумопеленгації фіксувалися зміни потужності акустичного сигналу.

На рис. 2 показано зміни в часі амплітуди шумів, які реєструвалися засобами шумопеленгації.

Дані реєстрації шумів приймалися в центрі обробки даних радіоканалом і з метою виділення тестових акустичних хвиль у реальному масштабі часу оброблялися методом спектрального аналізу. З метою усунення впливу коливань амплітуди акустичної хвилі за умов інтерференції, яка в умовах багатопрореневості проявляється підвищенням і послабленням амплітуди звуку вздовж акустичного променя (у місцях перетину променів різних напрямків), отриманий сигнал (розглядався в інтервалі довжин хвиль 5–20 м) осереднювався з вікном просторового осереднення 600 метрів (швидкість судна 4 вузли, період осереднення – 300 секунд). Зразок оцінки амплітудного спектра шумів показано на рис. 3.

На рисунку 3 виділяються лише стабільні в часі й суто періодичні шуми. Це штучне джерело шумів – частота 80 Гц та шуми носія джерела шумів у діапазонах частот 200–210 та 235–245 Гц. Для зазначених частот (80, 205, 240 Гц) були розраховані теоретичні оцінки дальності розповсюдження звуку в умовах хвилеводу за різними методиками.

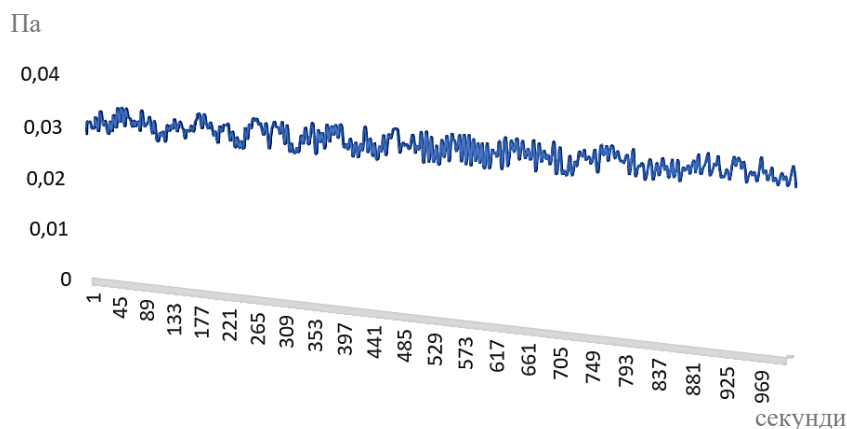


Рис. 2. Зміни у часі амплітуди шумів, які реєструвалися засобами шумопеленгації

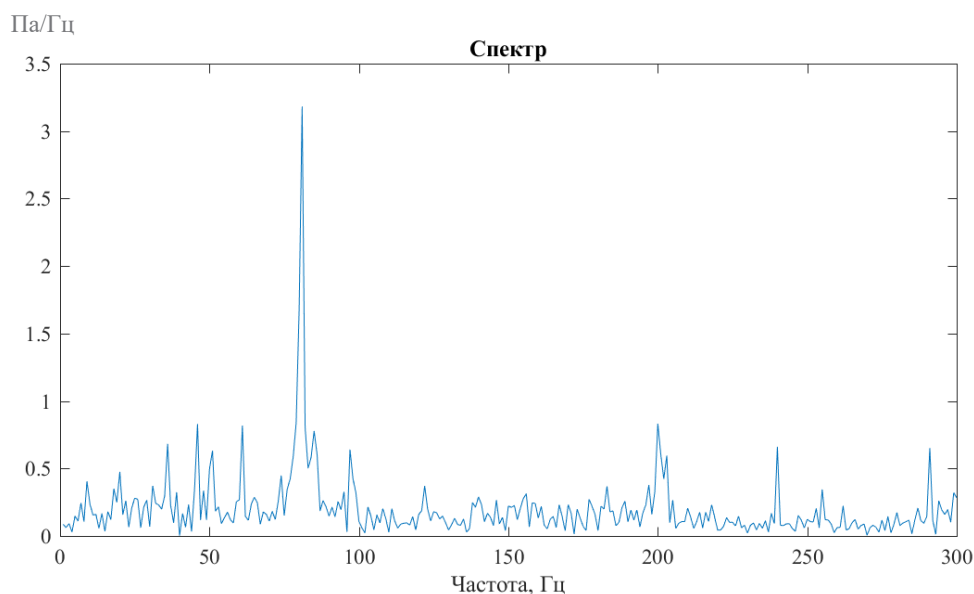


Рис. 3. Зразок амплітудного спектра шумів

Таблиця 1

Дальність (км) розповсюдження звуку на частотах 80, 205, 240 Гц, розрахована за різними методиками

Частота / довжина акустичної хвилі, Гц/м	За методом [19]	За методом [4]	За методом [20]
80/19	~ 1300	–	200
205/7,5	~ 500	–	–
240/6,4	~ 400	200	–

Таким чином встановлено, що в умовах виконання акустичного експерименту на глибокій воді, але без хвилеводу можна очікувати дальність розповсюдження на сотні кілометрів. Для зазначених частот нами виконані розрахунки втрати / поглинання дБ/км за формулами [3; 21; 22; 23] (рис. 4).

Розрахунки за емпіричними формулами, наведеними в зазначених публікаціях, були виконані з використанням кліматичних даних в одноградусному квадраті Марседена № 17859, у межах якого проводився гідроакустичний експеримент з визначення дальності розповсюдження звуку. Також було розраховано просторові зміни показника ослаблення акустичного сигналу вздовж акустичної траси, яка мала довжину 12 км. За даними розрахунків для діапазону частот 80–240 Гц показник ослаблення на відстані 12 км становив 40,8–40,87 Дб.

Розглянемо дані експериментального визначення дальності розповсюдження звуку вздовж зазначеної акустичної траси. Зауважимо, що для глибин менше 18 м дальність розповсюдження звуку в теплий сезон року не перевищувала 3–4 км [11; 12]. На рисунку 5 показані результати змін амплітуди спектрів на частотах 80, 205 та 240 Гц залежно від відстані між випромінювачем і приймачем (у метрах).

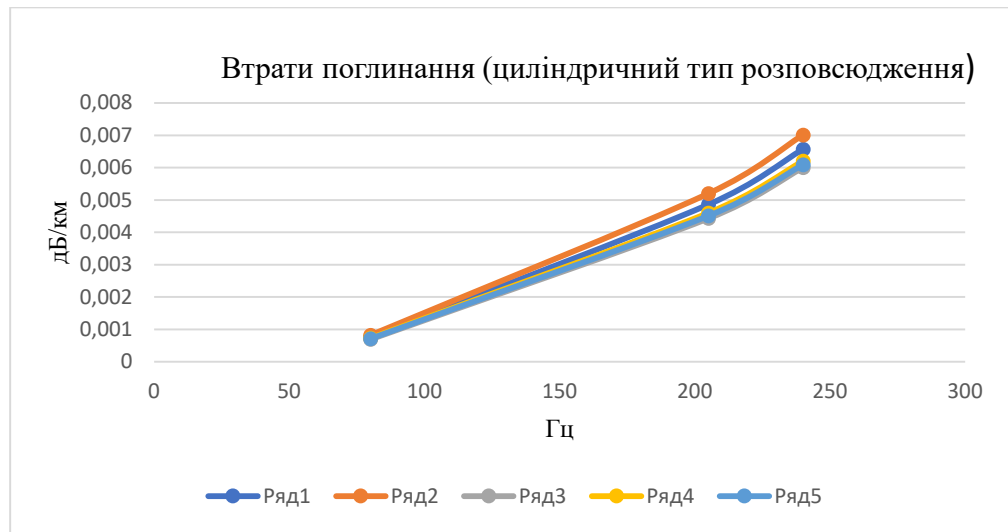
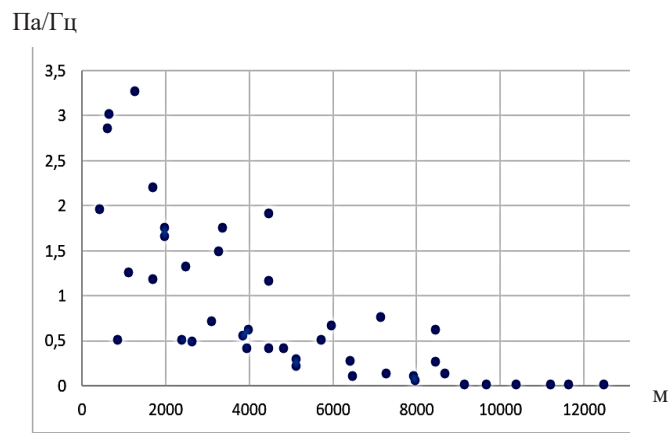
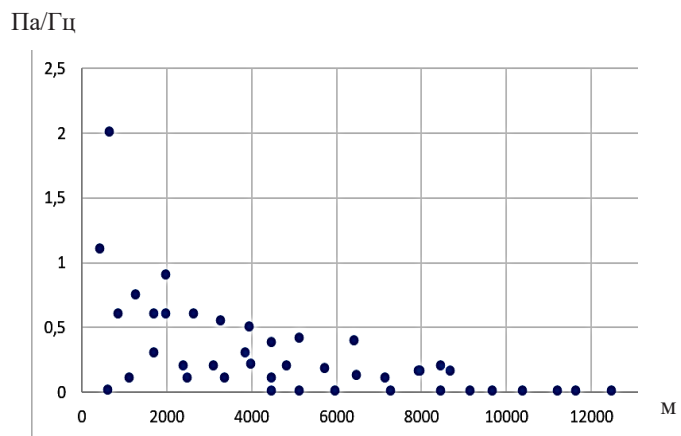


Рис. 4. Втрати / поглинання звуку дБ/км (циліндричний тип розповсюдження) залежно від частоти випромінювання в Гц (1 – Thorp, 2 – Schulkin, 3 – Fisher, 4 – Francois, 5 – Ainslie [20])

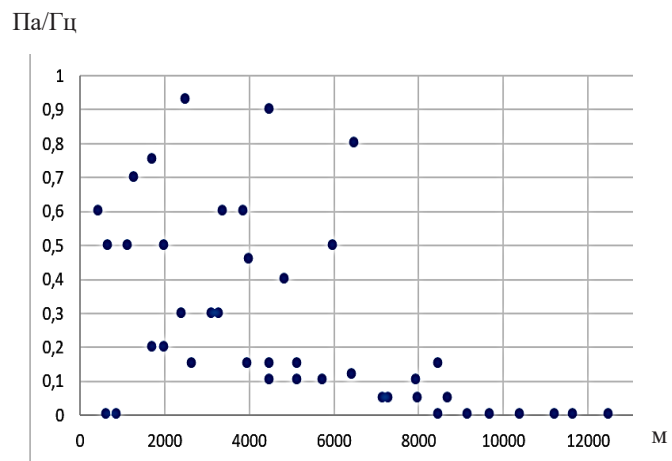
Дальність розповсюдження звуку (пороговий рівень 0,5) на частоті 80 Гц була близька до 8 км, на частотах 205–240 Гц – до 4–6 км. Важливо звернути увагу, що початкова амплітуда спектру шумів платформи на частотах 205 і 240 Гц приблизно у три рази нижча порівняно з потужністю штучного випромінювання на частоті 80 Гц. Однак експериментально зафіксована дальність розповсюдження звуку на цих частотах на мілководді відрізняється не так сильно. На нашу думку, саме кількість дотиків до дна та поверхні визначає швидкість зменшення енергії звуку. Тобто у спрощеному, променевому варіанті саме рефракція (вертикальний тип розподілу швидкості звуку з глибиною) відіграє ключову роль у можливостях передачі звукової енергії в шельфових зонах морів, де втрати енергії за взаємодії з дном максимальні. Це має підтвердження і в результатах наших розрахунків, наведених на рисунку 5, де просторові зміни показника ослаблення акустичного сигналу (чисельного значення амплітудного спектру) вздовж акустичної траси, яка мала довжину 12 км, відповідно до методики [20] практично не відрізняються для частот 80, 205 та 240 Гц: 40,8; 40,85; 40,87 відповідно. Адже, за нашими розрахунками, максимальні дальності розповсюдження акустичної енергії в глибокому морі, які залежать від кількості циклів в певному середовищі (у воді 66 666 циклів у герцевих діапазонах [19]) для вказаних частот близькі до 1200, 500 та 400 км відповідно (див. табл. 1). У роботі [24] наведено дані про поглинання звуку на частотах 516 та 1550 Гц. На частоті 516 Гц дальність фіксації звуку становить 4,5 км, на частоті 1550 Гц – до 2,5 км). Аналіз отриманих даних дав змогу також виявити певні методичні проблеми. Можна побачити, що на фіксованій відстані від джерела звуку різні приймачі фіксували різну потужність сигналу. Це явище для умов шельфу Чорного моря детально розглянуто в роботах [12; 25]. Це явище призводить до штучного епізодичного зменшення дальності розповсюдження звуку.



а



б



в

Рис. 5. Результати вимірювання амплітуди спектрів залежно від відстані між випромінювачем і приймачами (3 приймачі) на частотах: а) 80 Гц, б) 205 Гц, в) 240 Гц

Тенденції просторових змін амплітуди акустичного сигналу навколо джерела звуку мають лінійний характер. Виходячи із цього, вважається правомірною апроксимація зміни чисельного значення амплітудного спектра отриманого сигналу залежно від відстані від випромінювача лінійною функцією.

На рис. 6 показані результати змін амплітуд спектрів на частоті 80 Гц залежно від відстані між випромінювачем і приймачем.

Зміни вздовж акустичної траси показника амплітудного спектра потребують обґрунтованого алгоритму обробки даних. Вважалося б очевидним провести апроксимацію отриманих даних за методом найменших квадратів, як це показано на рисунку 6 пунктирною лінією. За таким методичним рішенням оброблені дані наведені пунктирною лінією. Але слід зауважити, що метод апроксимації зазначеного типу даних не є припустимим, оскільки отримані на однаковій відстані показники амплітудного спектра на частоті 80 Гц є різними не з причини розбігу за теорією вірогідності, а з відомої фізичної причини – рефракції звуку. Через рефракцію звуку у воді в певні точки акустичної траси на глибині встановленого гідрофона акустичні промені не приходять або приходять зі зменшеною щільністю. Таким чином, за умов рефракції отримані результати апроксимуються за максимальними значеннями амплітуд спектральної оцінки шумів. Така апроксимація на графіку показана суцільною лінією (див. рис. 6).

Для частоти 80 Гц було розраховано аналітичне рівняння залежності амплітуди спектра сигналу A (Па/Гц) від відстані L (км) до джерела звуку в умовах шельфу Чорного моря (глибини 40–50 м) для осіннього періоду (жовтень), яке має такий вигляд:

$$A = 3,64 - 0,36 \times L. \quad (3)$$

Оцінка достовірності отриманого рівняння (3) підтверджується:
коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,99$;
коефіцієнтом кореляції Пірсона $r = -0,99$.

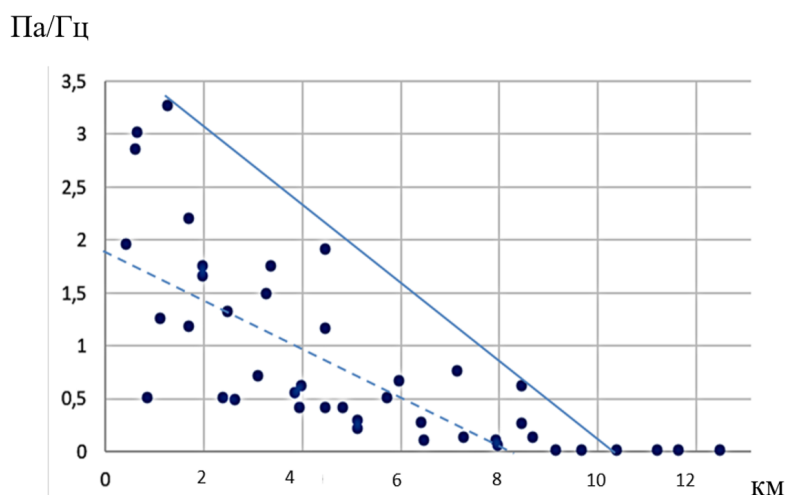


Рис. 6. Результати вимірювання амплітуд спектрів залежно від відстані між випромінювачем і приймачем на частоті 80 Гц

Висновки. Аналіз результатів застосування різних емпіричних рівнянь із визначення дальності розповсюдження звуку у воді дає підстави вважати, що коректних розрахункових методів досі не існує. Теоретичний метод визначення максимально можливої дальності розповсюдження акустичних хвиль різних довжин як константи кількості циклів (довжин хвиль) дає достовірний результат для розповсюдження акустичних хвиль лише у хвилеводі. У мілководних районах дальність розповсюдження звуку залежить обернено пропорційно від кількості перевідбиттів акустичних променів від дна та водної поверхні, яка збільшується зі зменшенням глибини. Так, у герцевому діапазоні частот дальність звуку на глибинах 10–20 м не перевищує 4 км, а на глибинах понад 40 м оцінюється вже як 6–8 км. Результатами виконаних досліджень показано, що тривіальне вимірювання дистанції, на якій амплітуда коливань акустичного тиску зменшується нижче за критичне значення, не є коректним за умов існування зон акустичної тіні. У спрощеному варіанті променевої гідроакустики для частоти 80 Гц запропоновано аналітичне рівняння залежності амплітуди спектра отриманого сигналу від відстані до джерела звуку в умовах шельфу Чорного моря.

ЛІТЕРАТУРА

1. Brekhovskikh L.M., Lysanov Yu.P. Theoretical foundations of ocean acoustics. *Gidrometeo*. 1982. 260 p.
2. Katsnelson B.G., Petnikov V.G. Acoustics of the shallow sea. Monograph. 1997. 191 p.
3. Ainslie M.A., McColm J.G. A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1998. Vol. 103 (3). P. 1671–1672.
4. Богушевич Б. К., Замаренова Л. Н., Скипа М. И. Дальне поширення звуку в приповерхневому підводному звуковому каналі північно-західної частини Чорного моря. *Акустичний симпозіум «Консонанс-2005»*. С. 84–89.
5. Cherepantsev A.S. Numerical model of attenuation of acoustic waves in the sea. *Anniversary issue “NELAX-2003”*. P. 107–1116.
6. Mytko A.V., Popov N.N. Laboratory workshop on the discipline “Marine Information Systems”. 2013. 64 p.
7. Underwater_acoustics. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Underwater_acoustics (дата звернення 01.07.2025).
8. Фесюнов О. Е. Геоекологія північно-західного шельфа Чорного моря. Монографія : АстроПринт. 2000. 100 с.
9. Materials of the second section of the scientific and technical conference “Technical Problems of Marine Resources Development”. September 5 to 30 and October 4, 2013. P. 49–54.
10. Radov V.A. Long-range propagation of sound in the central part of the Baltic Sea. *Acoustic journal*. 2001. Vol. 47. P. 189–199.
11. Замаренова Л. Н., Скипа М. И. Акустична модель квазістаціонарних трас. Частина 1. Концепція досліджень. *Гідроакустичний журнал*

- (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану) : зб. наук. пр. Запоріжжя : НТЦ ПАС НАН України, 2009. № 6. С. 10–23.
12. Замаренова Л. Н., Скіпа М. И. Акустична модель квазістаціонарних трас. Частина 2. Оцінка фізичної адекватності акустичної моделі. *Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану)* : зб. наук. пр. Запоріжжя : НТЦ ПАС НАН України, 2010. № 7. С. 58–72.
 13. Burenkov S., Dubrovsky N., Sabinin K. Acoustic monitoring of the Black Sea. Problems of the Black Sea. *International Conference. Sebastopol. Ukraine. November 10–15. 1992.* P. 101–110.
 14. Дивізінюк М. М. Акустичні поля Чорного моря. Держокеанаріум. 1998. 352 с.
 15. Бункин Ф. Б., Кравцов Ю. А., Омельченко Н. Н., Петников В. Г., Шмелев А. Ю. Результати дослідження стабільності звукових сигналів на стаціонарних акустичних трасах. *Акустичні хвилі в океані.* Наука. 1987. С. 84–91.
 16. Babiy V.I., Burlakova I.B., Virovlyansky A.L., Demikhovskiy S.V., Kravtsov Yu.A., Kukushkin V.D., Petnikov V.G., Rivelis E.A., Slavinsky M.M., Smirnov N.M., Farfel V.A., Shmelev A.Yu. Stationary acoustic path Crimea-Caucasus . Acoustics of the ocean environment. *Science.* 1989. P. 75–79.
 17. Furduev A.V. Acoustic monitoring of underwater environment variability (experimental verification of new methods). *Acoustic Journal.* 2001. Vol. 47 (3). P. 422–430.
 18. Belogortsev A.S., Belov A.I., Zhuravlev V.A., Khokha Yu.V. Acoustic models of shelf marine waters and the problem of their physical adequacy. Proceedings of the Nizhny acoustic scientific session. 2002. P. 64–67.
 19. Кучеренко Н. В., Капочкін Б. Б., Капочкіна М. Б. Прикладні аспекти закономірності процесу поглинання енергії акустичних хвиль у воді. *Водний транспорт.* 2025. Випуск 2 (43). С. 20–30. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.02.
 20. Ocean Acoustics/Underwater Acoustics. URL: <http://www.tsuchiya2.org/> (дата звернення 02.07.2025).
 21. Fisher F.H., Simmons V.P. Sound absorption in seawater. *Journal of the Acoustical Society of America.* 1977. Vol. 62. P. 558–564.
 22. Francois R.E., Garrison G.R. Sound absorption based on ocean measurements: Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions. *Journal of the Acoustical Society of America.* 1982. Vol. 72 (3). P. 896–907.
 23. Francois R.E. Garrison G.R. Sound absorption based on ocean measurements: Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption. *Journal of the Acoustical Society of America.* 1982. Vol. 72 (6). P. 1879–1890.

24. Богушевич Б. К., Замаренова Л. М., Скіпа М. І. Структура звукового поля на шельфі північно-західної частини Чорного моря: експеримент Консонанс-2005. С. 182–188.
25. Гладких І. І., Каналюк О. В., Капочкін Б. Б. Вплив рефракції звуку в Азово-Чорноморському районі на ефективність пошуку цілей гідролокаторами кругового огляду. *ScienceRise*. 2018. № 2. С. 14–18.

REFERENCES

1. Brekhovskikh, L.M., Lysanov, Yu.P. (1982). Theoretical foundations of ocean acoustics. *Gidrometeo*. 1982. 260 p.
2. Katsnelson, B.G., Petnikov, V.G. (1997). Acoustics of the shallow sea. Monograph. 191 p.
3. Ainslie, M.A., McColm, J.G. (1998). A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water. *Journal of the Acoustical Society of America*, 103 (3), 1671–1672.
4. Bogushevich, B.K., Zamarenova, L.N., Skipa, M.I. Long-range sound propagation in the near-surface underwater sound channel of the northwestern part of the Black Sea [Dalnie poshyrennia zvuku v prypoverkhnevomu pidvodnomu zvukovomu kanali pivnichno-zakhidnoi chastyny Chornoho moria]. Acoustic Symposium “Consonance-2005” (P. 84–89) [in Ukrainian].
5. Cherepantsev, A.S. Numerical model of attenuation of acoustic waves in the sea. Anniversary issue “NELAX-2003”. P. 107–1116.
6. Mytko, A.V., Popov, N.N. (2013). Laboratory workshop on the discipline “Marine Information Systems”. 64 p.
7. Underwater_acoustics. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Underwater_acoustics (accessed 01.07.2025).
8. Fesyunov, O.E. (2000). Geocology of the Northwestern Shelf of the Black Sea [Heoekolohiia pivnichno-zakhidnoho shelfa Chornoho moria]. Monograph: AstroPrint. 100 p. [in Ukrainian].
9. Materials of the second section of the scientific and technical conference “Technical Problems of Marine Resources Development”. September 5 to 30 and October 4, 2013 (P. 49–54).
10. Radov, V.A. (2001). Long-range propagation of sound in the central part of the Baltic Sea. *Acoustic journal*, 47, 189–199.
11. Zamarenova, L.N., Skipa, M.I. (2009). Acoustic model of quasi-stationary paths. Part 1. Research concept [Akustychna model kvazistatsionarnykh tras. Chastyna 1. Kontseptsiiia doslidzhen]. *Hydroacoustic journal (Problems, methods and means of research of the World Ocean): Collection of scientific works*, 6, 10–23. Zaporizhzhia: STC PAS NAS of Ukraine [in Ukrainian].
12. Zamarenova, L.N., Skipa, M.I. (2010). Acoustic model of quasi-stationary paths. Part 2. Assessment of the physical adequacy of the acoustic model [Akustychna model kvazistatsionarnykh tras. Chastyna 2. Otsinka fizychnoi adekvatnosti akustychnoi modeli.]. *Hydroacoustic*

- Journal (Problems, methods and means of research of the World Ocean): Collection of scientific works, 7, 58–72. Zaporizhzhia: STC PAS NAS of Ukraine [in Ukrainian].*
13. Burenkov, S., Dubrovsky, N., Sabinin, K. (1992). Acoustic monitoring of the Black Sea. Problems of the Black Sea. International Conference. Sebastopol. Ukraine. November 10–15. P. 101–110.
 14. Dyvizinyuk, M.M. (1998). Acoustic fields of the Black Sea [Akustychni polia Chornoho moria]. State Oceanarium. 352 p. [in Ukrainian].
 15. Bunkin, F.B., Kravtsov, Y.A., Omelchenko, N.N., Petnikov, V.G., Shmelev, A.Yu. (1987). Results of the study of the stability of sound signals on stationary acoustic paths [Rezultaty doslidzhennia stabilnosti zvukovykh syhnaliv na statsionarnykh akustychnykh trasakh]. Acoustic waves in the ocean. Nauka. P. 84–91 [in Ukrainian].
 16. Babiy, V.I., Burlakova, I.B., Virovlyansky, A.L., Demikhovskiy, S.V., Kravtsov, Yu.A., Kukushkin, V.D., Petnikov, V.G., Rivelis, E.A., Slavinsky, M.M., Smirnov, N.M., Farfel, V.A., Shmelev, A.Yu. (1989). Stationary acoustic path Crimea-Caucasus . Acoustics of the ocean environment. Science. P. 75–79.
 17. Furduev, A.V. (n.d.) Acoustic monitoring of underwater environment variability (experimental verification of new methods). *Acoustic Journal*, 47 (3), 422–430.
 18. Belogortsev, A.S., Belov, A.I., Zhuravlev, V.A., Khokha, Yu.V. (2002). Acoustic models of shelf marine waters and the problem of their physical adequacy. Proceedings of the Nizhny acoustic scientific session. P. 64–67.
 19. Kucherenko, N.V., Kapochkin, B.B., Kapochkina, M.B. (2025). Applied aspects of the regularities of the process of absorption of acoustic wave energy in water [Prykladni aspekty zakonmirnosti protsesu pohlynnannia enerhii akustychnykh khvyl u vodi]. *Water transport*, 2 (43), 20–30. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.02 [in Ukrainian].
 20. Ocean Acoustics/Underwater Acoustics. URL: <http://www.tsuchiya2.org/> (accessed 02.07.2025).
 21. Fisher, F.H., Simmons, V.P. (1977). Sound absorption in seawater. *Journal of the Acoustical Society of America*, 62, 558–564.
 22. Francois, R.E., Garrison, G.R. (1982). Sound absorption based on ocean measurements: Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions. *Journal of the Acoustical Society of America*, 72 (3), 896–907.
 23. Francois, R.E., Garrison, G.R. (1982). Sound absorption based on ocean measurements: Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption. *Journal of the Acoustical Society of America*, 72 (6), 1879–1890.
 24. Bogushevich, B.K., Zamarenova, L.M., Skipa, M.I. (2005). The structure of the sound field on the shelf of the northwestern part of the Black Sea [Struktura zvukovoho polia na shelfi pivnichno-zakhidnoi chastyny Chornoho moria]. The experiment Consonance-2005. P. 182–188 [in Ukrainian].

25. Gladkikh, I.I., Kanaliuk, O.V., Kapochkin, B.B. (2018). The influence of sound refraction in the Azov-Black Sea region on the efficiency of target search by all-round survey sonars [Vplyv refraktsii zvuku v Azovo-Chornomorskomu raioni na efektyvnist poshuku tsilei hidrolokatoramy kruhovoho ohliadu]. *ScienceRise*, 2, 14–18 [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 29.08.2025

Дата публікації: 30.10.2025

**КОНЦЕПТУАЛІЗАЦІЯ СИТУАТИВНОЇ PL (PARTY LOGISTICS)
ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПОСТАЧАЛЬНИКІВ ТРАНСПОРТНИХ ПОСЛУГ**

О.В. Кириллова¹, В.Ю. Кириллова²

¹ д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри
«Експлуатація портів і технологія вантажних робіт»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-3414-7364

² канд. техн. наук, доцент кафедри
«Експлуатація флоту і технологія морських перевезень»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-0738-0408

Анотація

Вступ. Традиційна практика класифікації постачальників транспортних послуг за моделлю Party Logistics (PL) ґрунтується на фіксованому типуванні компаній у межах шкали від 1PL до 5PL, що нерідко не відповідає реальному змісту їх функціональної діяльності в конкретних проєктних або контрактних взаємодіях. Це зумовлює методологічну суперечливість, аналітичну нечіткість і створює ризики псевдонаукової інтерпретації PL-рівнів. **Мета дослідження** – розроблення теоретико-методологічних засад і прикладного інструментарію ситуативної ідентифікації постачальників транспортних послуг за моделлю PL, з урахуванням динаміки їх функціональної ролі в межах конкретної взаємодії з клієнтом. Для реалізації цієї мети матеріал у статті логічно й послідовно структуровано: від формулювання альтернативної наукової парадигми, що розглядає PL-рівень як ситуативну функціональну роль постачальника транспортних послуг; через концепцію ситуативної PL-ідентифікації як інструмент реалізації цієї парадигми; до концептуальної моделі, яка визначає її принципи, критерії та логіку оцінювання; і завершено обґрунтуванням релевантного аналітичного інструментарію для практичної реалізації моделі в управлінні транспортним сервісом. **Результати.** У дослідженні сформульовано нову парадигму, що протиставляє функціональну PL-ідентифікацію постачальників транспортних послуг формальному «лейблінгу» цих компаній у межах спрощених класифікацій. Запропоновано концепцію ситуативної PL-ідентифікації, засновану на визначенні сервісної ролі постачальника залежно від рівня інтеграції, цифрової залученості, управлінської участі та розподілу відповідальності в межах конкретної взаємодії з клієнтом. Розроблено аналітичну методику оцінювання, де застосовуються: шкала Лайкерта для збору якісно-кваліфікованих експертних оцінок; метод аналізу ієрархії Сааті (АНР) для визначення вагових коефіцієнтів критеріїв оцінювання; інструменти нечіткої логіки (fuzzy logic) для обробки розмитості та невизначеності експертних суджень. **Наукова новизна дослідження** полягає у формулюванні концептуального підходу до PL-ідентифікації постачальників транспортних послуг, що базується на контекстно-залежній функціональній

ролі компанії в ланцюзі постачання; обґрунтуванні нової наукової парадигми ситуативної PL-ідентифікації, яка контрастує з поширеною практикою декларативного маркетингового позиціонування (зокрема, серед транспортно-експедиторських компаній) у межах фіксованої PL-ієрархії; розробці концепції ситуативної PL-ідентифікації як інструмента реалізації цієї парадигми, що забезпечує об'єктивне визначення рівня інтегрованості компанії у структуру ланцюга постачання конкретного клієнта; формуванні цілісного аналітичного інструментарію для реалізації завдання ситуативної PL-ідентифікації, який поєднує якісні експертні оцінки (шкала Лайкерта), вагову структурування критеріїв (метод АНР) та обробку невизначеності за допомогою апарату нечіткої логіки (fuzzy logic). **Практична цінність** полягає у створенні універсального інструменту для системного позиціонування постачальників транспортних послуг у ланцюгах постачання – з урахуванням реально виконуваних функцій, глибини інтеграції та цифрової зрілості. Це дає змогу уникнути помилкових або обумовлених маркетингом оцінок. **Висновки.** Запропонований підхід забезпечує точнішу ідентифікацію рівня сервісної інтеграції постачальників транспортних послуг в умовах динамічного ринку, мінімізує ризики хибного позиціонування та може бути корисним як для замовників послуг, так і для аналітиків, консультантів і стратегів, які здійснюють оцінювання учасників ланцюгів постачання.

Ключові слова: PL-ідентифікація, Party Logistics, транспортні системи, транспортний сервіс, транспортні технології, транспортні послуги, доставка вантажів, перевезення вантажів, ланцюг постачання, нечітка логіка, АНР, шкала Лайкерта, ситуативний підхід, сервісна інтеграція.

CONCEPTUALIZATION OF SITUATIONAL PL (PARTY LOGISTICS) IDENTIFICATION OF TRANSPORT SERVICE PROVIDERS

O.V. Kyrylova¹, V.Yu. Kyrylova²

¹ Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head
at the Department of Ports Operation and Cargo Handling Technology,
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-3414-7364

² Candidate of Engineering Sciences (Ph.D), Associate Professor
at the Department of Fleet Operation and Shipping Technology,
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-0738-0408

Summary

Introduction. The traditional practice of classifying transport service providers based on the Party Logistics (PL) model is rooted in a fixed typology of companies along a scale from 1PL to 5PL, which often fails to reflect the true functional roles they play in specific project or contractual interactions. This leads to methodological inconsistencies, analytical ambiguity, and the risk of pseudo-scientific interpretations of PL levels. The **purpose** of this study is to develop the theoretical and methodological foundations, as well as practical tools for situational identification of transport service providers within the PL model, taking into account the dynamics of their functional roles within specific client interactions. To achieve this goal, the article is logically

and sequentially structured: from formulating an alternative scientific paradigm that views the PL level as a situational functional role of transport service providers, to the concept of situational PL identification as a tool for implementing this paradigm, and a conceptual model that defines its principles, criteria, and evaluation logic; concluding with the justification of an appropriate analytical tool for the practical implementation of the model in transport service management. **Results.** The study formulates a new paradigm that contrasts functional PL identification of transport service providers with the formal «labeling» of these companies within simplified classifications. The concept of situational PL identification is proposed, based on defining the service role of the provider depending on the level of integration, digital engagement, management participation, and the distribution of responsibility within a specific client interaction. An analytical evaluation methodology is developed, which includes: a Likert scale for collecting qualitatively qualified expert evaluations; the Analytic Hierarchy Process (AHP) for determining the weight coefficients of evaluation criteria; fuzzy logic tools for processing vagueness and uncertainty in expert judgments. **Scientific novelty.** The scientific novelty of the research lies in: formulating a conceptual approach to PL identification of transport service providers based on the context-dependent functional role of a company within the supply chain; justifying a new scientific paradigm of situational PL identification, which contrasts with the widespread practice of declarative marketing positioning (especially among transport and freight forwarding companies) within a fixed PL hierarchy; developing the concept of situational PL identification as a tool for implementing this paradigm, ensuring an objective determination of the company's level of integration into the supply chain structure of a specific client; forming a comprehensive analytical toolkit for the situational PL identification task, which combines qualitative expert assessments (Likert scale), weighted criterion structuring (AHP method), and uncertainty processing using fuzzy logic. **Practical value.** The practical value lies in creating a universal tool for the systematic positioning of transport service providers in supply chains—taking into account actual functions performed, integration depth, and digital maturity. This allows for the avoidance of erroneous or marketing-driven assessments. **Conclusions.** The proposed approach provides more accurate identification of the level of service integration of transport service providers in the context of a dynamic market, minimizes the risks of incorrect positioning, and can be useful for both service clients and analysts, consultants, and strategists involved in the evaluation of supply chain participants.

Keywords: PL identification, Party Logistics, transport systems, transport service, transport technologies, transport services, cargo delivery, cargo transportation, supply chain, fuzzy logic, AHP, Likert scale, situational approach, service integration.

Вступ. У сучасних умовах глобалізації та цифровізації економіки, трансформації глобальних ланцюгів постачання, інтенсифікації мультимодальних перевезень і розвитку електронної комерції постачальники транспортних послуг зазнають суттєвих змін. Ці зміни супроводжуються появою нових моделей взаємодії між вантажовласниками й операторами, що потребує перегляду усталених підходів до класифікації учасників транспортних процесів.

Особливого значення набуває поширення понять, пов'язаних із моделлю PL (від англ. Party Logistics – «сторона логістики»). Використання англomовних

термінів 1PL, 2PL, 3PL, 4PL та 5PL у вітчизняному професійному середовищі нерідко супроводжується змішуванням понять, зміщенням акцентів або некоректним їх трактуванням. Попри широке застосування цих термінів у міжнародній практиці, в українській професійній спільноті досі бракує чіткого розмежування понять 1PL, 2PL, 3PL, 4PL та 5PL, що створює як термінологічні, так і управлінські суперечності.

Це зумовлює потребу в уточненні термінологічного апарату, аналізу сучасних підходів до класифікації транспортних послуг і суб'єктів, що їх надають, а також критичного переосмислення можливостей адаптації західних моделей до української транспортної науки, освіти та практики.

Постановка проблеми. Незважаючи на поступове поширення теорії логістики, в українському науковому, освітньому та професійному середовищі досі відсутнє уніфіковане розуміння та коректне використання термінології рівнів Party Logistics (PL). Застосування цієї термінології на вітчизняному ринку часто набуває декларативного або суто маркетингового характеру, що знижує її аналітичну цінність і точність. Подібне викривлення породжує ризики спрощеного або хибного трактування функціональних ролей учасників транспортного ринку, ускладнює контрактну взаємодію і створює бар'єри для ефективного управління матеріальними та інформаційними потоками.

Наприклад, окремі компанії, не маючи глибокої інтеграції в операційні процеси клієнта, позиціонують себе як 4PL або навіть 5PL-провайдери, що не відповідає їхній фактичній функціональності. Така ситуація підриває довіру до ринку, ускладнює процеси вибору, планування та контролю транспортних послуг у ланцюгах постачання й актуалізує потребу в систематизації та адаптації відповідної термінології до українських реалій.

Зміщення акцентів із технічної точності на маркетингові кліше потребує наукового аналізу та методологічного переосмислення. Ця проблема частково висвітлюється в окремих наукових публікаціях [1; 2] і статтях [3; 4], однак досі залишається недостатньо опрацьованою в контексті сучасної трансформації ринку транспортних послуг.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У наукових працях [1; 2] обґрунтовано фундаментальну проблему некоректного або надмірно вільного використання терміна «логістика» та його похідних у контексті транспортної термінології. Зокрема, акцентовано на необхідності чіткого розмежування понять «експедитор», «логістичний оператор» і «перевізник», а також на важливості збереження термінологічної точності в науковому, освітньому та практичному контекстах.

У статтях [3; 4] висвітлюється конфлікт між традиційною транспортною термінологією та «імпортованими» логістичними конструкціями, що часто ігнорують національні професійні реалії. Автори підкреслюють необхідність збереження технічної точності, пропонуючи підходи до термінологічного розмежування й адаптації відповідних понять.

Іноземні дослідження зосереджені переважно на еволюції моделей провайдерів PL. Так, у публікаціях [5–9] розглядаються відмінності між операційними (1PL–3PL) та інтеграційно-консультаційними (4PL–5PL) рівнями, акцентується

увага на поділі між провайдерами, що володіють матеріальними активами (asset-based), та інтеграторами, що діють без таких активів (non-asset-based).

У роботі [5] (1999) 3PL визначено як провайдерів, що виконують управління та фізичне виконання транспортних і складських операцій, включно з обробкою вантажів, управлінням запасами та інформаційним забезпеченням. Автори зазначають, що 3PL-оператори можуть як мати власні активи, так і працювати без них. Проте з ускладненням глобальних ланцюгів постачання та розвитком технологічних рішень цей рівень уже не задовольняє комплексні потреби клієнтів.

У книзі The Resilient Enterprise [6] (2005) обґрунтовано концепцію 4PL як стратегічних провайдерів, що координують логістичні мережі без володіння фізичними активами, використовуючи цифрові рішення та аналітику. Хоча термін 4PL (Fourth-Party Logistics) прямо не домінує в тексті, Йоссі Шеффі фактично описує функціонал, який відповідає сучасному розумінню саме цього рівня.

У публікації [7] (2007) автори аналізують роль 4PL як інтеграторів у ланцюгах постачання, які не володіють власними активами, але координують діяльність кількох 3PL-провайдерів для оптимізації логістичних процесів. Вони також розглядають моделі стратегічного узгодження, що дають можливість 4PL ефективно поєднувати бізнес-стратегію, впровадження інформаційних технологій та організаційну ефективність. Це джерело є ключовим для розуміння концепції 4PL як інтеграційно-консультаційного рівня логістичних провайдерів.

Разом із тим, незважаючи на зростання популярності класифікаційної моделі PL, у науковій та професійній спільноті все ще зберігається термінологічна невизначеність щодо чіткого розмежування між 3PL і 4PL. Наприклад, у роботі [8] (2013) підкреслюється, що в практичній діяльності межа між провайдерами 3PL і 4PL часто розмивається, що ускладнює ідентифікацію їх типу, особливо в умовах високого рівня сервісної інтеграції. Проте в цьому дослідженні [8] (2013) ще раз підкреслено, що 4PL-провайдери – це організації, здатні забезпечити комплексне управління ланцюгом постачання, виступаючи єдиною точкою контакту для замовника та використовуючи ресурси сторонніх 3PL-компаній.

Суттєвий внесок у концептуалізацію вищих рівнів логістичних провайдерів зроблено в роботі [9] (2012), де здійснено поглиблену аналітику еволюції моделей від 3PL і 4PL до п'ятого рівня – 5PL. Дослідники підкреслюють, що, на відміну від провайдерів, орієнтованих на фізичне виконання логістичних функцій (3PL) або на координацію зовнішніх підрядників без володіння активами (4PL), п'яті сторони логістики (5PL) є переважно віртуальними структурами. Їхня діяльність зосереджена на повній інформаційній інтеграції всієї мережі постачання з використанням цифрових платформ, електронних каналів обміну даними та інноваційних технологій управління. У дослідженні зазначено, що виникнення 5PL було зумовлено трансформацією бізнес-середовища, зростанням обсягів електронної комерції та необхідністю швидкої адаптації ланцюгів постачання до змін зовнішнього середовища. Автори акцентують увагу на стратегічному характері 5PL-моделей, які діють як мережеві інтегратори та синхронізатори процесів у цифровій логістиці.

Таким чином, треба наголосити, що саме поява моделі 5PL стала не просто продовженням лінійної еволюції логістичних провайдерів, а відображенням моменту зміни ПАРАДИГМИ у сфері управління ланцюгами постачання – від фізичних потоків до інтелектуального (цифрового) управління інформаційними зв'язками між усіма учасниками мережі.

У статті [10] (2018) представлено поняття 6PL як провайдера, орієнтованого на забезпечення сталого розвитку, цифрову трансформацію і адаптивність систем постачання.

Таким чином, як сказано у джерелі [11] (2024), XXI століття виходить за межі 3PL, 4PL і навіть 5PL... Стаття [11] висуває ідеї про 7PL–10PL як гіпермоделі майбутнього:

- 7PL пов'язується з інтеграцією глибокої аналітики, управлінням даними в глобальних екосистемах та міжгалузєвою координацією;
- 8PL–9PL – з розширенням логістичних функцій на суміжні сфери: інтелектуальне управління енергоресурсами, адаптивне планування в соціальних і екологічних системах, упровадження технологій квантових обчислень;
- 10PL – як гіпотетична «фінальна стадія» еволюції логістичних моделей, що передбачає повністю автономну екосистему ланцюга постачання, засновану на самооптимізувальних мережах і автономному прийнятті рішень.

Проте ці моделі автори прямо визначають як гіпотетичні концепції, що не мають практичного втілення [11].

Позиція Maersk [12] (2024) підтверджує це: компанія визнає 5PL як логічний наступний крок після 4PL, проте підкреслює, що модель ще перебуває у стані формування і не є індустріальним стандартом.

У цьому контексті окрему увагу заслуговує позиція компанії Maersk – одного з провідних світових операторів у сфері контейнерних перевезень і управління ланцюгами постачання. У матеріалі [12] (2024) компанія визначає 4PL як інтегратора, що здійснює стратегічне управління ланцюгами постачання без володіння фізичними активами. 5PL, за оцінкою Maersk, є наступним кроком розвитку 4PL, орієнтованим на ще глибшу інтеграцію бізнес-процесів клієнта. Водночас Maersk підкреслює, що станом на 2024 рік модель 5PL перебуває лише на стадії початкового формування і поки що не є загальноновизнаним індустріальним стандартом. Це твердження надає обґрунтовані підстави для критичної оцінки подальших рівнів – 6PL–10PL, які нині мають переважно декларативний характер і розглядаються як елементи теоретичного прогнозування, а не результат практичного впровадження. Їх популяризація, згідно з поглядами багатьох фахівців, здебільшого ґрунтується на маркетингових побудовах і концептуальному моделюванні, що не підкріплені ні емпіричними даними, ні системним упровадженням у бізнес-середовищі.

У вітчизняному науковому просторі питання класифікації PL-операторів також активно досліджується. Водночас більшість робіт мають фрагментарний характер і здебільшого зосереджені на адаптації та узагальненні закордонного досвіду, не пропонуючи власних глибоких концептуальних моделей або системних інтерпретацій.

Так, у статті [13] (2020) автори акцентують увагу на основних проблемах вітчизняного ринку логістичних послуг в Україні, як-от зростання конкуренції,

зниження рентабельності перевізників, дефіцит сучасних логістичних комплексів та низький рівень інтеграції інформаційних систем. При цьому серед перспектив розвитку визначено поширення практик 3PL і 4PL, а також тенденцію до злиття та поглинання в галузі.

У роботі [14] представлено систематизований огляд еволюції постачальників логістичних послуг (PL-провайдерів) від 1PL до 5PL, а також розглянуто концептуальні моделі наступних рівнів 6PL–10PL. Автор видокремлює ознаки та функціональні характеристики кожного типу, аналізує вплив цифровізації, штучного інтелекту та інтернету речей на зміну ролі логістичних провайдерів, а також пропонує критерії вибору оператора залежно від специфіки запиту клієнта. Зокрема, наведено умовні вектори розвитку в межах моделей 6PL–10PL. Водночас автор під час аналізу літератури зазначає приклад, коли у власному пресрелізі [15] транспортно-експедиторська компанія Dedola Global Logistics позиціонує себе як 10PL-провайдер, хоча, за висновками інших дослідників [16], таке позиціонування має переважно маркетинговий характер.

Таким чином, на основі проведеного критичного аналізу можна стверджувати:

– подальше розширення та надмірна деталізація PL-моделей у бік 6PL–10PL наразі не мають достатнього емпіричного, практичного чи термінологічного підґрунтя. У більшості випадків це є наслідком гіперконцептуалізації або маркетингових інтерпретацій, що радше ускладнюють термінологічне поле, ніж сприяють його впорядкуванню;

– навіть класифікації операторів рівнів 1PL–5PL залишаються термінологічно нечіткими у прикладному вимірі. Розмитість меж між типами провайдерів, відсутність єдиних класифікаційних критеріїв та високий рівень сервісної інтеграції ускладнюють ідентифікацію конкретної ролі оператора в ланцюзі постачання. Це свідчить про наявність низки ще не вирішених питань, що потребують подальшого концептуального й емпіричного опрацювання.

Формулювання цілей статті. Метою дослідження є розроблення теоретико-методологічних засад і прикладного інструментарію ситуативної ідентифікації постачальників транспортних послуг за моделлю Party Logistics (PL) з урахуванням динаміки їх функціональної ролі в межах конкретної взаємодії з клієнтом.

Відповідно до поставленої мети в роботі вирішуються такі завдання:

1) обґрунтувати методологічний підхід до PL-ідентифікації як ситуативної функціональної ролі постачальника, що реалізується в межах конкретної взаємодії з клієнтом; сформулювати відповідну парадигму, яка протиставляє динамічне рольове трактування PL-моделі спрощеним класифікаційним схемам;

2) сформувати концептуальну модель ситуативної PL-ідентифікації постачальника транспортних послуг, що поєднує рольовий, контекстуальний і функціональний підходи; визначити її принципи та критерії з урахуванням глибини сервісної інтеграції, цифрової участі, розподілу відповідальності та ступеня залучення постачальника до стратегічного управління ланцюгом постачання;

3) обґрунтувати прикладний інструментарій формалізації моделі, зокрема: методика збору експертних оцінок із використанням шкали Лайкерта; застосування методу аналізу ієрархій Сааті (АНП) для визначення вагових коефіцієнтів критеріїв; використання інструментів нечіткої логіки (fuzzy logic) для врахування

експертної невизначеності; побудову інтегральної шкали PL-рівня для підсумкової ідентифікації.

Основний матеріал дослідження

1. Парадигма і концепція ситуативної PL-ідентифікації постачальників транспортних послуг

У сучасних умовах цифровізації та сервісної трансформації транспортної галузі класифікація постачальників відповідних послуг за моделлю PL (Party Logistics – «сторона логістики») потребує концептуального переосмислення. Поширене у практиці розуміння PL як жорсткої організаційної характеристики компанії є спрощеним і методологічно вразливим.

Натомість у межах цього дослідження пропонується принципово інше трактування: PL-модель розглядається не як статичний «лейбл» або фіксована ознака компанії, а як функціональна роль, яку вона виконує у взаємодії з конкретним замовником, у межах визначеного контракту, проекту або бізнес-процесу. Це означає, що належність компанії до певного PL-рівня не є незмінною характеристикою, а визначається лише на основі аналізу глибини її інтеграції в ланцюг постачання конкретного клієнта.

Таким чином, PL-ідентифікація є релевантною лише в контексті конкретної взаємодії. Такий підхід дає змогу враховувати глибину інтеграції постачальника в ланцюг постачання замовника, характер розподілу відповідальності, рівень сервісу, а також цифрові й управлінські компетенції.

Наприклад, транспортно-експедиторська компанія, судноплавна лінія або глобальний перевізник можуть виступати для одного клієнта лише як 2PL-оператор, виконуючи базове перевезення. Водночас у межах контракту з іншим замовником та сама компанія може координувати підрядників, управляти інформаційними потоками та запасами, тобто фактично виконувати функції 4PL (координація процесів). А в рамках стратегічного партнерства з третім клієнтом – розробляти IT-рішення для управління мережею постачання, що відповідає ролі 5PL (інтеграція цифрових рішень і стратегічного планування).

Такий підхід не обмежується лише транспортно-експедиторськими компаніями. Аналогічна логіка може бути застосована до контейнерних операторів, інтермодальних провайдерів, операторів інфраструктури та судноплавних ліній, які в окремих кейсах можуть реалізовувати функціональну роль 3PL, 4PL або навіть 5PL залежно від змісту і форми співпраці з конкретним клієнтом.

Отже, PL-ідентифікація є динамічною, ситуативною і функціональною, а не сталою або організаційно-правовою ознакою. Її визначення має базуватися на аналізі фактичної участі компанії у створенні цінності для клієнта, через глибину сервісної інтеграції, рівень контролю, використання цифрових рішень і залучення до стратегічного управління ланцюгом постачання.

Такий підхід дає змогу подолати методологічні спрощення й уникнути псевдонаукової «класифікаційної гонки», коли компанії самостійно позиціонують себе як 4PL, 5PL або навіть 10PL без фактичного функціонального підґрунтя.

Узагальнюючи викладене, підкреслимо, що PL-рівень – це не «етикетка» і не атрибут компанії як такої, а характеристика її ролі в конкретних відносинах із клієнтом. Це рольова модель, яка існує суто в контексті визначеної взаємодії,

контракту або проєкту. Компанія не «є» 3PL чи 4PL – вона виконує функції 3PL чи 4PL у певному контексті.

Із цієї позиції концепція PL-ідентифікації набуває методологічної глибини й наближається до системного аналізу, орієнтованого на функціональність, а не декларативність. У певному сенсі така парадигма співзвучна з принципами квантової механіки: роль компанії у PL-моделі «визначається» лише в момент «вимірювання», тобто в момент фактичної взаємодії з конкретним клієнтом. Як і у квантовій фізиці, де стан частинки не фіксований до моменту спостереження, так і у транспортному сервісі PL-рівень компанії не є об'єктивною ознакою до початку співпраці.

Практичне значення запропонованої парадигми полягає у тому, що вона:

- дає змогу точніше ідентифікувати типи постачальників у прикладних дослідженнях;
- запобігає хибній автоматичній класифікації компаній на основі виключно маркетингового позиціонування;
- створює основу для розробки практичної методики ідентифікації PL-рівня в конкретних кейсах;
- актуалізує потребу в аналізі сервісної інтеграції та цифрової взаємодії у транспортному сервісі.

Таким чином, у межах цього дослідження запропоновано:

- парадигму PL-ідентифікації транспортної компанії як ситуативного функціонального статусу в ланцюзі постачання – на протизвагу традиційній практиці «лейблінгу», яка ігнорує специфіку реальної взаємодії;
- концепцію ситуативної PL-ідентифікації – як інструмент реалізації цієї парадигми, що дає змогу об'єктивно аналізувати рівень інтегрованості компанії у ланцюг постачання конкретного клієнта.

У межах цієї парадигми та відповідної концепції постає завдання формалізувати підходи до практичного розпізнавання PL-рівня постачальника транспортних послуг. Для цього в наступному розділі статті обґрунтовується концептуальна модель ситуативної PL-ідентифікації, яка поєднує рольовий, контекстуальний і функціональний підходи й закладає основу для подальшого розвитку формалізованого інструментарію.

2. Концептуальна модель ситуативної PL-ідентифікації постачальників транспортних послуг: критерії, принципи та структура

У межах запропонованої парадигми PL-ідентифікації, сформульованої вище, постає потреба в конкретизації теоретико-методологічних підходів, які дають змогу не лише концептуально описати, але й практично ідентифікувати роль компанії у межах конкретної взаємодії в ланцюзі постачання.

З огляду на динамічність, функціональність та ситуативність PL-ідентифікації доцільно перейти від фіксованої категоризації до операціонального аналізу інтегрованості компаній у структуру постачання.

2.1. Параметри й виклики PL-ідентифікації (сучасні виклики сервісної інтеграції та потреба в оновленні підходів до PL-ідентифікації)

Сучасна трансформація ринку транспортних послуг супроводжується зростаючою складністю ланцюгів постачання, активною цифровізацією, розвитком

платформних рішень і переходом до сервісно-орієнтованих моделей управління. У таких умовах традиційна класифікація постачальників транспортних послуг за принципом PL (від 1PL до 5PL) дедалі частіше не відповідає реальній складності функціональних ролей, які виконують оператори. У класичних типологіях компанії «маркуються» як 3PL, 4PL або 5PL на основі їх загального організаційного профілю, що не враховує специфіки конкретних контрактних або проєктних взаємодій. Водночас сучасні вимоги до сервісної інтеграції, гнучкості та індивідуалізації обслуговування зумовлюють необхідність переходу до більш точного, функціонально-орієнтованого підходу до PL-ідентифікації.

2.2. Критерії функціональної участі постачальника транспортних послуг у ланцюзі постачання (критерії функціональної PL-ідентифікації)

Запропонований у статті підхід передбачає визначення рівня PL-ідентифікації постачальника транспортних послуг не на основі його номінальної (декларативної) належності до певної PL-категорії, а відповідно до фактичних функцій і ролей, які він реалізує в межах конкретної взаємодії з клієнтом. Така функціональна ідентифікація базується на системі критеріїв, що відображають не лише тип наданих послуг, але й глибину залучення постачальника до управління процесами в ланцюзі постачання. Як ключові критерії доцільно виокремити:

- рівень сервісної інтеграції – чи виконує компанія суто операційні функції (наприклад, перевезення), чи також бере участь у тактичному управлінні (координація підрядників, оптимізація маршрутів) або у стратегічному плануванні (розробка IT-рішень, консалтинг з питань оптимізації ланцюгів);

- ступінь відповідальності та контролю – чи має постачальник доступ до інформаційної системи клієнта, чи володіє правом прийняття рішень щодо планування поставок, чи несе відповідальність за результат на всіх етапах ланцюга;

- глибина цифрової участі – чи використовує компанія платформи обміну даними, аналітичні інструменти, інтегровані ERP-системи, засоби прогнозування, або ж діє в ізольованому режимі без доступу до цифрової інфраструктури клієнта;

- формат контрактної взаємодії – чи йдеться про разове надання транспортних, чи про довгострокове стратегічне партнерство з елементами спільного планування, розподілу ризиків (risk-sharing) або управління запасами.

Сукупність зазначених критеріїв дає можливість сформувати комплексну характеристику ролі постачальника в межах конкретного кейса та забезпечує підґрунтя для подальшої формалізованої оцінки його PL-рівня.

2.3. Принципи функціональної й контекстуальної PL-ідентифікації

На основі вищеозначених критеріїв можна сформулювати низку принципів, що становлять основу функціональної PL-ідентифікації:

Принцип динамічності: роль компанії визначається не її постійним статусом, а функціями, які вона виконує в межах конкретного проєкту. Тобто той самий оператор може виступати 2PL-провайдером для одного клієнта і 5PL – для іншого.

Принцип ситуативності: PL-рівень визначається в контексті конкретного замовника, контракту або бізнес-процесу. Отже, PL-ідентифікація є відносною, а не абсолютною характеристикою компанії.

Принцип функціональності: акцент робиться не на організаційно-правовому статусі компанії чи наявності у неї фізичних активів, а на тих функціях, які вона реально виконує у створенні цінності для клієнта.

Зазначені принципи забезпечують можливість переходу до більш точного, адаптивного та методологічно вивіреного інструментарію аналізу ролі компаній у ланцюгах постачання.

2.4. Типові сценарії та приклади застосування функціональної PL-ідентифікації

Функціональна PL-ідентифікація передбачає, що та сама компанія може виконувати різні ролі залежно від характеру взаємодії, наприклад:

- у кейсі А транспортно-експедиторська компанія здійснює лише доставку вантажів (2PL);
- у кейсі Б ця сама компанія, працюючи з іншим клієнтом, виконує функції координації перевезень та управління запасами (4PL);
- у кейсі В вона розробляє кастомізоване цифрове рішення для оптимізації ланцюга постачання клієнта та виступає стратегічним партнером (5PL).

Таким чином, застосування принципів функціональної PL-ідентифікації дає змогу уникнути псевдонаукового «лейблінгу» компаній і замінити його на контекстно-залежну, функціональну оцінку їхньої ролі у створенні логістичної цінності. Це, зі свого боку, відкриває нові можливості для стратегічного планування, побудови ефективних моделей аутсорсингу та поглибленої аналітики ринку транспортних послуг.

2.5. Блокова структура концептуальної моделі PL-ідентифікації постачальників транспортних послуг

Сформульовані в попередніх розділах парадигмальні засади та принципи функціональної PL-ідентифікації постачальників транспортних послуг створюють підґрунтя для побудови концептуальної моделі, яка системно поєднує рольовий, контекстуальний і функціональний підходи. Така модель має не лише аналітичне значення, а й прикладну цінність для інституційного, корпоративного й експертного застосування в процесі ідентифікації PL-рівня в умовах конкретної взаємодії між постачальником і клієнтом.

Концептуальна модель ситуативної PL-ідентифікації вибудовується як інтегрована система, що охоплює чотири взаємопов'язані блоки (рис. 1), які формують змістове ядро концепції:

- контекстуальний блок – фіксує специфіку бізнес-ситуації: тип клієнта, характер контракту, рівень довіри, масштаб і тривалість проєкту;
- функціональний блок – деталізує виконувані функції: транспортування, управління підрядниками, планування, цифрову інтеграцію, розподіл відповідальності;
- рольовий блок – визначає функціональну роль компанії у взаємодії: операційна (2PL), координаційна (3PL–4PL), стратегічно-інтегративна (5PL);
- інтеграційний блок – забезпечує узагальнення даних із попередніх блоків для формування синтетичного уявлення про рівень PL.

Ця структура є основою для подальшого формалізованого оцінювання, яке розглядається в наступному розділі.

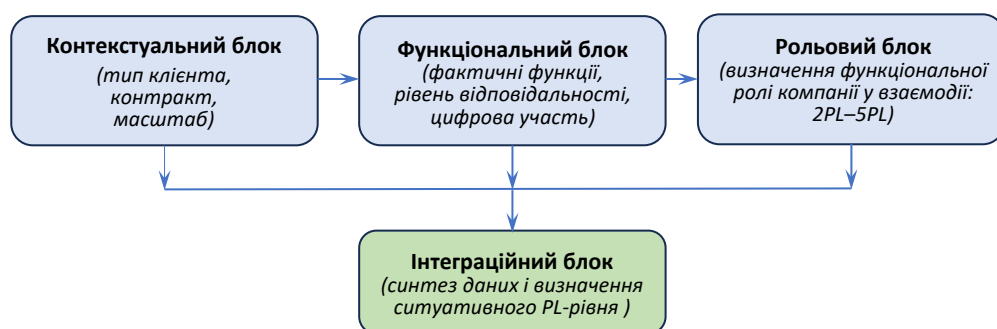


Рис. 1. Схема концептуальної моделі ситуативної PL-ідентифікації постачальника транспортних послуг

Модель передбачає послідовний рух від опису контексту, через аналіз функціональної участі, до визначення рольової належності постачальника. Центральне місце в ній належить принципу «ситуативної релевантності», відповідно до якого кожна функція компанії оцінюється лише в межах конкретної взаємодії, а не як частина її сталого організаційного статусу.

Змістовна взаємодія між блоками забезпечує можливість диференційованого оцінювання й унеможливує механічне «призначення» PL-рівня без урахування контексту. Таким чином, модель дає змогу:

- адаптувати ідентифікацію до конкретних кейсів;
- уникнути псевдонаукового «лейблінгу»;
- створити передумови для кількісного аналізу.

Модель базується на таких ключових підходах:

- рольовий підхід – виходить з того, що компанія виконує певну роль у межах ланцюга постачання, яка може змінюватися від кейса до кейса;
- контекстуальний підхід – враховує обмеження й умови конкретної взаємодії, що формують рамки можливостей для компанії;
- функціональний підхід – орієнтується на реальні дії постачальника, а не на його маркетингову самопрезентацію або організаційний статус.

Поєднання цих підходів у єдиній моделі дає змогу перейти від статичного сприйняття PL-рівнів до більш точного, адаптивного та прикладного інструменту аналітики.

2.6. Структурна візуалізація концептуальної моделі PL-ідентифікації постачальника транспортних послуг

Для узагальнення логіки моделі доцільно представити її у вигляді багаторівневої схеми, яка відображає загальну послідовність етапів (рис. 2):

- вхід – опис контексту взаємодії;
- основний етап – аналіз і деталізація функціональної участі компанії;
- вихід – результат ідентифікації, тобто визначення ситуативного PL-рівня на основі системного аналізу.

Таким чином, сформована концептуальна модель ситуативної PL-ідентифікації постачальників транспортних послуг виступає як методологічна основа і структурний міст між парадигмою функціонального підходу та її

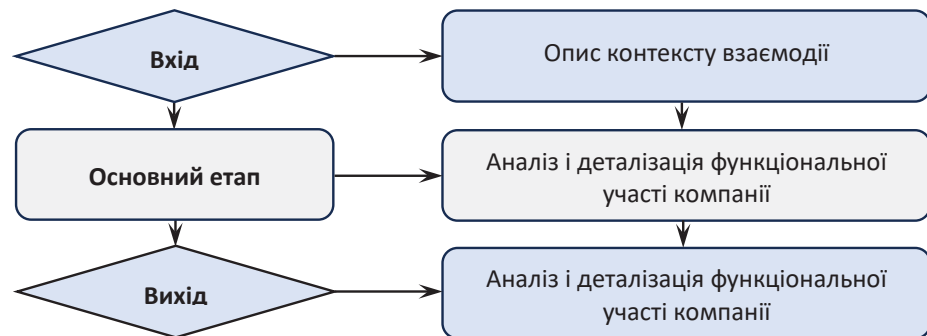


Рис. 2. Етапи реалізації моделі ситуативної PL-ідентифікації: від контексту до визначення PL-рівня

формалізованим прикладним інструментарієм. Саме це створює передумови для переходу до наступного етапу дослідження – розроблення інструментів кількісного оцінювання, що забезпечують застосування моделі в аналітичній і управлінській практиці.

3. Інструментарій формалізації та прикладної реалізації концептуальної моделі PL-ідентифікації постачальника транспортних послуг

Цей розділ присвячено формалізації концептуальної моделі через порівняння з традиційними підходами, деталізацію її структурних елементів і обґрунтування інструментів прикладного застосування.

3.1. Завдання і логіка формалізації моделі PL-ідентифікації

У межах парадигми ситуативної PL-ідентифікації PL-рівень розглядається не як стала характеристика підприємства, а як змінний функціональний статус, що залежить від характеру взаємодії з конкретним клієнтом. Такий підхід передбачає відмову від універсального «лейблінгу» постачальників на користь динамічного аналізу їхньої фактичної ролі в ланцюзі постачання. У цьому контексті виникає потреба у формалізації концептуальної моделі, яка дасть змогу здійснювати рольову PL-ідентифікацію на основі релевантних ознак, що відображають рівень сервісної, цифрової та управлінської інтеграції компанії у взаємодії з клієнтом. На відміну від традиційних моделей, що спираються на загальні уніфіковані та формалізовані матриці ознак або процесні стандарти, запропонований підхід орієнтується на змістовний аналіз взаємодії у межах конкретного бізнес-кейса.

Мета цього розділу – обґрунтувати інструментальний підхід до PL-ідентифікації, що враховує функціональну роль постачальника в конкретному ланцюзі постачання та забезпечує адаптацію до контексту взаємодії з клієнтом.

3.2. Традиційний підхід до PL-ідентифікації: ознакові матриці

Для контрасту із запропонованим підходом коротко розглянемо традиційну матричну модель PL-ідентифікації, яка базується на фіксованих ознаках та рівнях функціональності. Хоча подібна матрична типологізація (табл. 1) отримала широке висвітлення в літературі, вона демонструє низьку адаптивність до контекстуальних змін взаємодії в ланцюгах постачання.

Таблиця 1

Типова матриця ознак для статичної PL-ідентифікації постачальників транспортних послуг

Критерій / Ознака	2PL	3PL	4PL	5PL
Виконання перевезення	✓	✓	✓	✓
Координація підрядників	–	✓	✓	✓
Інтеграція IT-систем	–	✓	✓	✓
Стратегічне планування	–	–	✓	✓
Розробка IT-рішень	–	–	✓	✓
Участь у формуванні політики	–	–	✓	✓
Автономія прийняття рішень	–	✓	✓	✓
Глибина інтеграції	Низька	Середня	Висока	Дуже висока

Такий підхід дає змогу швидко позиціонувати компанії на основі типової поведінкової матриці. Проте він не враховує специфіки конкретного контракту, характеру відносин із замовником та гнучкості ролей.

Водночас аналіз показує обмеженість подібних типологій у контексті динамічного середовища транспортних послуг. На відміну від них, описана в попередньому розділі концептуальна модель ситуативної PL-ідентифікації передбачає гнучке оцінювання функціональної участі постачальника – із фокусом на характер конкретної взаємодії з клієнтом. У наступних підрозділах деталізуємо структуру критеріїв, логіку оцінювання та прикладні методи реалізації цієї моделі.

3.3. Структура моделі: критерії та показники

Запропонована аналітична модель ґрунтується на чотирьох ключових групах критеріїв: функціональні, цифрові, управлінські й організаційні¹ (табл. 2). При цьому акцент робиться на функціональній реалізації, а не на формальному статусі компанії. Кожна група має відповідні показники:

1) функціональні критерії відображають сервісну інтеграцію (Fi): рівень участі в управлінні транспортним процесом (від планування до виконання); наявність відповідальності за підрядників або субпровайдерів; участь у формуванні транспортної політики клієнта; управління запасами, інформаційними потоками, зворотними потоками;

2) цифрові критерії відображають цифрову інтеграцію (Di): використання інформаційних систем інтегрованих із системами клієнта; надання доступу до цифрових платформ у режимі реального часу; розробка або адаптація IT-рішень для конкретного клієнта; автоматизація операцій та використання цифрової аналітики;

3) управлінські критерії відображають рівень участі в управлінні (Ri): участь у стратегічному плануванні з клієнтом; розробка спільних індикаторів ефективності (KPI); автономність у прийнятті рішень; вплив на формування бюджетів або інвестиційних рішень у межах ланцюга;

4) організаційні критерії відображають рівень організаційної відповідальності (Si): тип взаємодії (контракт, партнерство, стратегічна угода); стійкість та тривалість співпраці; наявність єдиного контактного центру, мультифункціональних команд; рівень персоналізації обслуговування.

¹ У цій частині статті використано позначення чотирьох груп критеріїв – Fi, Di, Ri, Si, які відповідають функціональним, цифровим, управлінським та організаційним ознакам. Далі в аналітичній частині моделі (п. 3.5) для спрощення застосовуються скорочені літерні позначення F, D, M, O, що є структурними еквівалентами відповідних груп. Вони наведені в таблиці зіставлення (див. п. 3.5).

Таблиця 2
Структура основних груп критеріїв PL-ідентифікації постачальника транспортних послуг

Група критеріїв	Позначення	Напрямок оцінювання	Приклади показників
Функціональні	Fi / F	Сервісна інтеграція	Планування, підрядники, запаси
Цифрові	Di / D	Цифрова інтеграція	ІТ-системи, доступ до платформ
Управлінські	Ri / M	Управлінська участь	KPI, автономність, планування
Організаційні	Si / O	Стратегічна відповідальність	Тип взаємодії, тривалість, персоналізація

3.4. Формалізація концептуальної моделі PL-ідентифікації постачальника транспортних послуг

Для забезпечення об'єктивної ідентифікації рівня PL-позиціонування постачальника транспортних послуг у межах конкретної взаємодії з клієнтом пропонується формалізована модель, яка базується на оцінюванні чотирьох груп критеріїв.

Загальна формалізована постановка задачі полягає у визначенні PL-рівня постачальника транспортних послуг на підставі кількісної оцінки його реальної функціональної ролі в конкретному кейсі взаємодії, а не за наперед визначеною категорією (2PL, 3PL тощо). Для цього здійснюється оцінювання чотирьох основних груп критеріїв:

- функціональні характеристики (Fi);
- цифрова інтеграція (Di);
- управлінська участь (Ri);
- організаційна відповідальність (Si),
- з урахуванням їх вагової значущості для замовника – Wf, Wd, Wr, Ws .

Інтегральний рівень PL-ідентифікації постачальника транспортних послуг (PL_{id}) визначається за формулою середньозваженої оцінки:

$$PL_{id} = \frac{Wf \cdot Fi + Wd \cdot Di + Wr \cdot Ri + Ws \cdot Si}{Wf + Wd + Wr + Ws}, \quad (1)$$

де Fi, Di, Ri, Si – оцінки відповідних критеріїв за п'ятибальною шкалою;

Wf, Wd, Wr, Ws – вагові коефіцієнти відповідно до значущості кожної групи в конкретному випадку;

$PL_{id} \in [1, 0; 5, 0]$ – середньозважена агрегована оцінка, що визначає фактичний рівень PL-участі постачальника.

Формула (1) відображає середньозважене агрегування оцінок за кожною з груп критеріїв відповідно до їхньої вагомості в контексті конкретної взаємодії.

Формалізоване представлення моделі із зазначенням функції нормалізації:

$$PL_{id} = f(Wf \cdot Fi + Wd \cdot Di + Wr \cdot Ri + Ws \cdot Si), \quad (2)$$

де: $f(\dots)$ – функція нормалізації та інтерпретації результатів, що виконує:

- нормалізацію агрегованого значення PL_{id} до уніфікованої шкали $[1, 0; 5, 0]$ (у разі використання розширених або нечітких оцінок);

– мапінг значення PL_{id} до типових PL-рівнів на основі інтервальних шкал, наведених у табл. 3.

Залежно від прикладного контексту $f(\dots)$ може бути лінійною (як у наведеній формулі) або мати форму нечіткої функції належності у випадку застосування fuzzy logic.

Інтерпретація результатів. На основі нормалізованого значення PL_{id} здійснюється віднесення постачальника транспортних послуг до однієї з типових PL-категорій згідно з інтегральною шкалою (табл. 3), наприклад:

$$PL_{id} \in [1,0 - 2,5] \rightarrow 2PL; \quad PL_{id} \in [2,6 - 3,5] \rightarrow 3PL;$$

$$PL_{id} \in [3,6 - 4,5] \rightarrow 4PL; \quad PL_{id} \in [4,6 - 5,0] \rightarrow 5PL.$$

Запропонована модель забезпечує гнучку та ситуаційно адаптовану PL-ідентифікацію, дає змогу врахувати специфіку конкретного кейсу взаємодії, а також застосовується для об'єктивного ранжування постачальників у межах тендерних, контрактних чи аудиторських процедур.

Таблиця 3

Типові інтервали інтегральної шкали

Агреговане значення (PL_{id})	Інтерпретація PL-рівня
1,0–2,5	2PL – виконавець базових транспортних операцій без координаційних або сервісних надбудов
2,6–3,5	3PL – постачальник стандартних транспортних послуг із розширеним сервісом, включно з координацією та базовою ІТ-інтеграцією
3,6–4,5	4PL – інтегратор, що бере участь в управлінні ланцюгом постачання, зокрема у його плануванні й оптимізації
4,6–5,0	5PL – стратегічний партнер із високим ступенем цифрової та організаційної інтеграції, здатний управляти складними транспортними мережами

3.5. Емпірична матриця оцінювання PL-рівня постачальника транспортних послуг на основі чотирьох груп критеріїв

Для прикладної реалізації концептуальної моделі (див. п. 3.4) використовується спрощена система позначень критеріїв – F, D, M, O (табл. 4), яка відповідає чотирьом змістовим блокам оцінювання: функціональному, цифровому, управлінському й організаційному.

Таблиця 4

Відповідність між позначеннями формалізованої та емпіричної моделі

Позначення в моделі	Позначення в таблиці	Змістовне значення
F_i	F	Сервісна інтеграція / функціональні характеристики
D_i	D	Цифрова інтеграція
R_i	M	Управлінська участь як прояв відповідальності
S_i	O	Організаційна відповідальність як індикатор стратегічної інтеграції

Такий підхід дає змогу зручно представити модель у табличному форматі (табл. 5) для практичного застосування.

Узагальнене значення PL-рівня постачальника представимо у вигляді функції:

$$PL_{id} = f(F, D, M, O), \quad (3)$$

де кожен параметр оцінюється за п'ятибальною шкалою.

Таблиця 5

Емпірична шкала оцінювання PL-рівня постачальника транспортних послуг за критеріями F, D, M, O

Критерії	1PL	2PL	3PL	4PL	5PL
Рівень сервісної інтеграції (F / Fi)	1	2	3	4	5
Рівень цифрової інтеграції (D / Di)	1	1	2	3	5
Рівень управлінської участі (M / Ri)	1	1	2	3	4
Рівень організаційної відповідальності (O / Si)	1	2	2	3	4
Примітки.					
1. Значення у таблиці відображають типовий рівень розвитку відповідної характеристики для кожного PL-рівня за п'ятибальною шкалою.					
2. Значення 1PL виключно до шкали виключно з аналітичною метою – для повноти порівняння. У контексті транспортного сервісу 1PL зазвичай означає самостійне виконання функцій клієнтом без залучення зовнішніх постачальників і не є предметом детальної PL-ідентифікації. Основна увага приділяється рівням 2PL–5PL як об'єктам зовнішнього сервісного делегування.					

Такий підхід дає змогу здійснювати векторну інтерпретацію PL-рівня як сукупності характеристик, що визначають не лише тип наданих послуг, а й ступінь залучення постачальника до управління ланцюгом постачання.

3.6. Інструменти оцінювання та практичне використання моделі PL-ідентифікації

Для практичного застосування моделі можуть бути використані різні методи кількісного оцінювання:

Шкала Лайкерта – дає можливість оцінювати кожен критерій за п'ятибальною шкалою (1 – повністю відсутній, 5 – повною мірою реалізований). Це зручно для експертних оцінок, опитувань клієнтів або внутрішньої самооцінки постачальника транспортних послуг.

Метод аналізу ієрархій Сааті (АНР) – може бути застосований для визначення вагових коефіцієнтів на основі парних порівнянь між критеріями. Це дає змогу кількісно відобразити відносну значущість критеріїв у кожному конкретному кейсі. Метод є доречним під час стратегічного планування, підбору постачальника транспортних послуг або розробки контрактних вимог у складних багато-критеріальних середовищах.

Фаззі-логіка (fuzzy logic, нечітка логіка) – використовується для опрацювання ситуацій, коли оцінки критеріїв є суб'єктивними або неформалізованими. Дає змогу враховувати ступінь належності до множин типу «високий», «середній» тощо, що особливо доречно для аналізу якісних характеристик або нечітко окреслених інтервалів. Наприклад, якщо складно визначити, чи відповідає постачальник рівню 3 PL чи 4PL, фаззі-модель дає можливість задати «нечітке»

значення (наприклад, 3,6 з певним ступенем упевненості). Такий підхід є особливо ефективним, коли неможливо надати точні числові значення або коли оцінювання постачальника транспортних послуг базується на лінгвістичних змінних. Таким чином, фаззі-логіка – це підхід, який надає можливість оперувати нечіткими, лінгвістичними змінними (наприклад, «середній рівень сервісу») замість жорсткої бінарної логіки (так / ні), що підвищує адаптивність моделі до реалій бізнесу.

Інтегральна шкала PL-рівня – це інтерпретаційна шкала, що дає змогу зіставити агреговане числове значення, отримане за результатами оцінювання постачальника транспортних послуг за відповідними критеріями (наприклад, середньозваженою або середньоарифметичною оцінкою), із типологією PL-рівнів. Завдяки такому мапінгу можна не лише кількісно зафіксувати рівень функціональної участі провайдера в ланцюзі постачання, але й здійснити рольову інтерпретацію відповідно до прийнятих у галузі класифікаційних рівнів (2PL–5PL). Типові інтервали інтегральної шкали можуть бути представлені у вигляді табл. 3.

Це дає можливість швидко здійснити порівняння між різними провайдерами, побудувати рейтинг або візуалізувати позицію компанії в системі координат цифрово-функціональної та організаційної зрілості. Інтервали можуть бути адаптовані до конкретних умов дослідження, а також уточнені з урахуванням застосування вагових коефіцієнтів або нечіткої (fuzzy) логіки. Шкала слугує основою для виведення загального PL-профілю постачальника в межах окремої взаємодії чи кейсу.

Розроблена модель PL-ідентифікації має прикладне значення як універсальний аналітичний інструмент, що дає змогу з високим ступенем точності й адаптивності оцінити роль постачальника транспортних послуг у ланцюзі постачання. Її гнучка структура, формалізований підхід і можливість використання різних методів оцінювання забезпечують широку сферу практичного застосування. Основні напрями використання моделі:

- у процесі стратегічного планування постачань модель дає змогу обґрунтовано оцінити доцільність залучення конкретного провайдера транспортних послуг, враховуючи ступінь його залученості, відповідальності та цифрової інтеграції;
- під час проведення тендерних процедур забезпечується уніфікований підхід до ранжування претендентів, включно з оцінюванням за критеріями, що мають ключове значення для конкретного замовника;
- для цілей аудиту поточних взаємодій PL-ідентифікація дає змогу не лише класифікувати постачальника, а й оцінити динаміку його розвитку, що корисно для прийняття рішень про продовження, перегляд або розширення співпраці;
- у контексті навчання та сертифікації модель може використовуватися як базова методика для підготовки фахівців з управління ланцюгами постачання та транспортного сервісу, а також для оцінювання їх професійного рівня;
- для контрактного регулювання результати PL-ідентифікації можуть бути включені до контрактних умов як формалізований опис очікуваного рівня залученості та відповідальності постачальника.

Переваги моделі:

- ситуативність, обумовлена врахуванням контексту взаємодії між клієнтом і постачальником, а не лише формальних ознак;
- гнучкість, пов'язана з можливістю варіювання вагових коефіцієнтів та інтерпретацій залежно від конкретного випадку;
- методологічна сумісність, що забезпечує інтеграцію різних методів оцінювання (шкала Лайкерта, АНР, фаззі-логіка) з метою адаптації до різних аналітичних середовищ;
- інтероперабельність, яка дає змогу використовувати результати PL-ідентифікації в суміжних аналітичних та інформаційних системах підприємства або транспортної мережі.

Таким чином, розроблена модель PL-ідентифікації постачальника транспортних послуг створює основу для побудови нової практики управління транспортною взаємодією в умовах цифрової трансформації, орієнтованої на гнучкість, прозорість та стратегічну узгодженість взаємодій.

3.7. Висновки за результатами верифікації моделі

Для верифікації запропонованої авторської концепції було проведено числову реалізацію розробленої експертно-аналітичної моделі PL-ідентифікації постачальників транспортних послуг. Дослідження здійснено на умовному прикладі – гіпотетичній компанії, яка виступає об'єктом функціонального аналізу в межах конкретного контрактного сценарію. Як інструментарій застосовано шкалу Лайкерта для збору експертних оцінок, метод аналізу ієрархій Сааті (АНР) для визначення вагових коефіцієнтів критеріїв та інструменти нечіткої логіки (fuzzy logic) для врахування розмитості суджень і побудови функцій належності.

Усі три підходи дали узгоджені результати, завдяки чому можна зробити висновок про високу ступінь стабільності й логічної узгодженості моделі. Така взаємна підтримка результатів, отриманих у різних експертних форматах – від лінійного шкалювання до багатокритеріального та нечіткого аналізу, – підтверджує її валідність та адаптивність до різних практичних умов.

Отримані результати підтверджують методологічну обґрунтованість і прикладну релевантність моделі, що створює надійну основу для її подальшого використання в теоретичних дослідженнях і практичних завданнях PL-ідентифікації в системах постачання.

Висновки

1. У роботі запропоновано:

- наукову парадигму PL-ідентифікації постачальників транспортних послуг як ситуативної функціональної ролі, що реалізується в межах конкретної взаємодії з клієнтом. Такий підхід протиставляється усталеній практиці «лейблінгу» компаній у межах фіксованих класифікацій (1PL–5PL) та не підкріплених емпірично моделей 6PL+;
- концепцію ситуативної PL-ідентифікації як прикладне втілення зазначеної парадигми, що дає змогу здійснювати об'єктивний аналіз рівня інтегрованості конкретної компанії у структуру ланцюга постачання певного замовника.

2. Запропонований підхід є методологічно вивіреном, практично орієнтованим інструментом, який:

- унеможливорює псевдонаукову або маркетингову класифікацію компаній без функціонального аналізу;
- дає змогу оцінювати реальний рівень інтеграції постачальника у ланцюг постачання з урахуванням конкретного контрактного контексту;
- забезпечує точну рольову ідентифікацію компанії у ланцюзі постачання як динамічної сервісної одиниці, а не фіксованого суб'єкта.

Такий підхід відкриває нові можливості для системного аналізу й експертного оцінювання рівнів сервісної інтеграції в умовах цифрової трансформації ринку транспортних послуг.

3. Запропонована концептуальна модель ситуативної PL-ідентифікації постачальників транспортних послуг формує нову рольову, контекстуальну структуру, що відсутня в класичних PL-типологіях. Вона відображає методологічний перехід – від формальної категоризації компаній до ідентифікації функцій, що фактично реалізуються в межах конкретної взаємодії з клієнтом.

Такий підхід орієнтований не на встановлення жорстких типологічних меж, а на системне осмислення фактичної функціональної ролі постачальника в сервісній архітектурі ланцюга постачання. Це дає змогу відійти від практики формального «прикріплення» PL-статусу до компаній і перейти до фахового аналізу їхніх функцій у конкретних контрактних або проєктних відносинах, що точніше відображає сучасну динаміку розвитку транспортних послуг.

На відміну від традиційних PL-моделей, які передбачають фіксацію ролі в межах сталої типології, запропонований підхід базується на принципах:

- динамічності (роль компанії визначається в процесі конкретної взаємодії, а не наперед),
- функціональності (ключову роль відіграє зміст виконуваних функцій, а не організаційна структура постачальника),
- ситуативності (PL-ідентифікація здійснюється в контексті взаємодії з конкретним клієнтом, а не на загальному рівні).

Оригінальність підходу полягає у:

- методологічному зрушенні від «лейблінгу» до функціонального, контекстуального тлумачення PL-ролей;
- запровадженні принципу динамічної PL-ідентифікації;
- можливості створення об'єктивних, прикладних критеріїв для аналізу ролі компанії в ланцюзі постачання залежно від характеру клієнтських відносин.

4. Для верифікації запропонованої моделі PL-ідентифікації було здійснено числову апробацію на умовному прикладі – гіпотетичній компанії, проаналізованій у межах визначеного сценарію взаємодії з клієнтом. Було застосовано три підходи: шкалу Лайкерта, метод аналізу ієрархій Сааті (АНР) та інструменти нечіткої логіки (fuzzy logic). Узгодженість результатів за всіма методами підтверджує валідність розробленого інструментарію та засвідчує його адаптивність до різних форматів експертного оцінювання. Це дає підстави рекомендувати запропоновану модель для подальших емпіричних досліджень і практичного використання у процесах PL-ідентифікації в ланцюгах постачання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Король В. Ю. (Кириллова В. Ю.) Організація експедиторського обслуговування транспортних процесів і систем доставки вантажів у контейнерах : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01. Одеса, 2019. 286 с.
2. Кириллова О. В. Теоретичні основи управління роботою флоту у транспортно-технологічних системах : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.01 – транспортні системи. Одес. нац. мор. ун-т. Одеса, 2016. 470 с.
3. Король В. Ю. (Кириллова В. Ю.), Кириллова О. В. Експедирування і логістика: термінологічні протиріччя, підміна понять і їх розмежування. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2018. № 15. С. 42–51. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2018/150197>.
4. Кириллова О. В., Король В. Ю. (Кириллова В. Ю.). Застосування «наукоподібних» словоформ терміна «логістика» у сфері транспортних технологій: проблема або сучасна тенденція. *Технології та інфраструктура транспорту : матеріали міжнар. наук.-техн. конф., Харків, 14–16 трав. 2018 р.* Харків : УкрДУЗТ, 2018. С. 190–193.
5. Berglund M., Van Laarhoven P., Sharman G., Wandel S. Third-party logistics: is there a future? *The International Journal of Logistics Management*. 1999. Vol. 10 (1). P. 59–70.
6. Sheffi Y. *The Resilient Enterprise: Overcoming Vulnerability for Competitive Advantage*. MIT Press, 2005.
7. Fulconis F., Paché G., Saglietto L. 4PL and models of strategic alignment. *NETCOM: Réseaux, communication et territoires*. 2007. Vol. 21 (3–4). P. 395–406. DOI: 10.4000/netcom.2294. URL: journals.openedition.org/netcom/2294.
8. Langley C.J., Capgemini Consulting, Penn State University, Panalpina. *The 17th Annual Third-Party Logistics Study: The State of Logistics Outsourcing*. 2013. URL: <https://www.kornferry.com/insights/this-week-in-leadership/508-2013-17th-annual-third-party-logistics-study>.
9. Hosie P., Sundarakani B., Tan A., Koźlak A. Determinants of Fifth Party Logistics (5PL): Service Providers for Supply Chain Management. *International Journal of Logistics Systems and Management*. 2012. Vol. 13 (3). P. 287–316. DOI: 10.1504/IJLSM.2012.049700.
10. Gruchmann T., Melkonyan A., Krumme K. Logistics Business Transformation for Sustainability: Assessing the Role of the Lead Sustainability Service Provider (6PL). *Logistics*. 2018. Vol. 2, Issue 4. DOI: 10.3390/logistics2040025.
11. *Logistics Insider*. 6PL and Beyond: A Leap Towards Logistics Excellence. 2024. URL: <https://www.logisticsinsider.in/6pl-and-beyond-a-leap-towards-logistics-excellence/>.
12. Maersk. What are 1PL, 2PL, 3PL, and 4PL logistics in supply chain management? 2024. URL: <https://www.maersk.com/logistics-explained/supply-chain-management/2024/04/24/navigate-the-world-of-party-logistics-with-our-guide-to-1pl-2pl-3pl-4pl-models>.
13. Решетнікова О. В., Боровик Т. В., Терещенко І. О. Аналіз та перспективи розвитку ринку логістичних послуг

- в Україні. *Економіка і управління*. 2020. № 2. С. 24–29. URL: <http://dspace.e-u.edu.ua/handle/123456789/687>.
14. Свічинський С. В. Огляд можливостей сучасних постачальників транспортно-логістичних послуг в інтегрованих транспортних системах. *Автомобіль і суспільство*. 2023. № 1 (20). С. 239–247. DOI: 10.36910/automash.v1i20.1053.
15. Freight Forwarding Company “Dedola”. 10PL Press Release. 2012. URL: <https://dedola.com>.
16. Колодзівєва Т. Еволюція постачальників логістичного сервісу: проблеми теорії та практики. Сучасні проблеми управління підприємствами: теорія і практика : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., Харків, Торунь, 18–19 березня 2019 р. URL: <https://scholar.google.com.ua/scholar?oi=bibs&cluster=1086421694166831151&btnI=1&hl=ru>.

REFERENCES

1. Korol, V.Y. (Kyryllova, V.Y.). (2019). Organization of forwarding services of transport processes and systems of cargo delivery in containers [Orhanizatsiia ekspedytorskoho obsluhovuvannia transportnykh protsesiv i system dostavky vantazhiv u konteinerakh] (PhD dissertation). Odessa [in Ukrainian].
2. Kyryllova, O.V. (2016). Theoretical foundations of the fleet operation management in transport-technological systems [Teoretychni osnovy upravlinnia robotoiu flotu u transportno-tekhnologichnykh systemakh] (Doctoral dissertation). Odessa National Maritime University [in Ukrainian].
3. Korol, V.Y. (Kyryllova, V.Y.), & Kyryllova, O.V. (2018). Expeditions and logistics: terminological contradictions, substitution of concepts and their delimitation [Ekspedyruvannia i lohistyka: terminologichni protyrichchia, pidmina poniat i yikh rozmezhuvannia]. *Transportni systemy ta tekhnologii perevezhen*, 15, 42–51. <https://doi.org/10.15802/tsst2018/150197> [in Ukrainian].
4. Kyryllova, O.V., & Korol, V.Y. (Kyryllova, V.Y.). (2018). The use of ‘scientific’ word forms of the term ‘logistics’ in the field of transport technologies: a problem or a modern trend [Zastosuvannia ‘naukopodibnykh’ slovoform termina ‘lohistyka’ u sferi transportnykh tekhnologii: problema abo suchasna tendentsiia]. In Proceedings of the International Scientific and Technical Conference ‘Transport Technologies and Infrastructure’ (pp. 190–193). Kharkiv: UkrDUZT [in Ukrainian].
5. Berglund, M., Van Laarhoven, P., Sharman, G., & Wandel, S. (1999). Third-party logistics: is there a future? *The International Journal of Logistics Management*, 10 (1), 59–70.
6. Sheffi, Y. (2005). *The Resilient Enterprise: Overcoming Vulnerability for Competitive Advantage*. MIT Press.
7. Fulconis, F., Paché, G., & Saglietto, L. (2007). 4PL and models of strategic alignment. NETCOM: Réseaux, communication et territoires. *Networks and Communications Studies*, 21 (3–4), 395–406. <https://doi.org/10.4000/netcom.2294>.

8. Langley, C.J., Capgemini Consulting, Penn State University, & Panalpina. (2013). The 17th Annual Third-Party Logistics Study: The State of Logistics Outsourcing. <https://www.kornferry.com/insights/this-week-in-leadership/508-2013-17th-annual-third-party-logistics-study>.
9. Hosie, P., Sundarakani, B., Tan, A., & Koźlak, A. (2012). Determinants of Fifth Party Logistics (5PL): Service Providers for Supply Chain Management. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 13 (3), 287–316. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2012.049700>.
10. Gruchmann, T., Melkonyan, A., & Krumme, K. (2018). Logistics business transformation for sustainability: Assessing the role of the lead sustainability service provider (6PL). *Logistics*, 2 (4), 25. <https://doi.org/10.3390/logistics2040025>.
11. Logistics Insider. (2024). 6PL and beyond: A leap towards logistics excellence. <https://www.logisticsinsider.in/6pl-and-beyond-a-leap-towards-logistics-excellence/>.
12. Maersk (2024). What are 1PL, 2PL, 3PL, and 4PL logistics in supply chain management? <https://www.maersk.com/logistics-explained/supply-chain-management/2024/04/24/navigate-the-world-of-party-logistics-with-our-guide-to-1pl-2pl-3pl-4pl-models>.
13. Reshetnikova, O.V., Borovyk, T.V., & Tereshchenko, I.O. (2020). Analysis and prospects for the development of the logistics services market in Ukraine [Analiz ta perspektyvy rozvytku rynku lohistychnykh posluh v Ukraini]. *Economics and Management*, (2), 24–29. <http://dspace.e-u.edu.ua/handle/123456789/687> [in Ukrainian].
14. Svichynskyi, S.V. (2023). Overview of the capabilities of modern transport and logistics service providers in integrated transport systems [Ohliad mozhlyvostei suchasnykh postachalnykiv transportno-lohistychnykh posluh v intehrovanykh transportnykh systemakh]. *The Car and Society*, 1(20), 239–247. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i20.1053> [in Ukrainian].
15. Freight Forwarding Company “Dedola” (2012). 10PL Press Release. <https://dedola.com>.
16. Kolodzieva, T. (2019). Evolution of logistics service providers: Problems of theory and practice [Evolutsiia postachalnykiv lohistychnoho servisu: problemy teorii ta praktyky]. In Proceedings of the International Scientific and Practical Conference ‘Modern problems of enterprise management: theory and practice’, Kharkiv, Ukraine, Torun, Poland. March 18–19, 2019. <https://scholar.google.com.ua/scholar?oi=bibs&cluster=1086421694166831151&btnI=1&hl=ru> [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 18.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 22.08.2025

Дата публікації: 30.10.2025

**ПІДТРИМАННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ МОРСЬКИХ СУДЕН ПІД ЧАС
ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ КАТАЛІТИЧНОГО ВІДНОВЛЕННЯ
ВИПУСКНИХ ГАЗІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ**

О.А. Куропятник

д-р філософії, докторант кафедри суднових енергетичних установок,
Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна,
orcid id: 0009-0008-2565-5771

Анотація

Вступ. Експлуатація суден морського транспорту нерозривно пов'язана з викидом в атмосферу шкідливих речовин, що утворюються в циліндрі дизеля під час згоряння палива. Одними з наднебезпечних з них є оксиди азоту, емісія яких регламентується вимогами MARPOL. Найбільш ефективно очищення випускних газів від оксидів азоту забезпечують системи каталітичного відновлення. Водночас через використання в цих системах сечовини як реагенту збільшується емісія діоксиду вуглецю. Через підвищення парникового ефекту це сприяє глобальному потепленню. **Мета** дослідження – визначення оптимальних режимів роботи суднової системи каталітичного відновлення випускних газів суднових дизелів. При цьому під оптимальними розуміються такі, за яких забезпечується мінімальне підвищення емісії діоксиду вуглецю з одночасним підтриманням високого рівню зниження емісії оксидів азоту. **Результати.** Дослідження виконувалися на судні класу Gas Carrier водотоннажністю 127645 тонн із двома головними двигунами 5X72DF Hyundai-WinGD та трьома допоміжними двигунами 6H35DF Hyundai-HiMSEN, випускні гази яких піддавалися каталітичному відновленню. Експериментально встановлені оптимальні режими, за яких відносна збільшення емісії діоксиду вуглецю не перевищує 2,3 % для обох типів дизелів. Емісія оксиду азоту для дизелів 5X72DF Hyundai-WinGD не перевищує 3,3 г/(кВт·год) та не перевищує 2,4 г/(кВт·год) для дизелів 6H35DF Hyundai-HiMSEN, що відповідає вимогам Додатка VI MARPOL. Відносна зниження емісії оксидів азоту на цих режимах становить 66,7–83,4 % для дизеля 5X72DF Hyundai-WinGD та 60,8–78,3 % для дизеля 6H35DF Hyundai-HiMSEN. **Висновки.** Системи каталітичного відновлення випускних газів суднових дизелів характеризуються наявністю оптимальних експлуатаційних режимів. Саме на цих режимах забезпечується мінімальне підвищення емісії діоксиду вуглецю з одночасним підтриманням високого рівню зниження емісії оксидів азоту. Збіг отриманих значень для малообертового дизеля 5X72DF Hyundai-WinGD та середньообертового дизеля 6H35DF Hyundai-HiMSEN свідчить про коректність проведення досліджень та можливості імплементації їх результатів на всі типи дизелів і систем каталітичного відновлення.

Ключові слова: екологічні показники, емісія діоксиду вуглецю, емісія оксидів азоту, морський транспорт, система каталітичного відновлення, судновий дизель.

MAINTAINING THE ENVIRONMENTAL FRIENDLINESS OF SEAGOING
VESSELS WHEN USING CATALYTIC REDUCTION SYSTEMS FOR MARINE
DIESEL ENGINES

O.A. Kuropyatnyk

PhD, Doctoral Student of the Department of Ship Power Plants,
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0008-2565-5771

Summary

Introduction. Operation of sea transport vessels is inextricably linked with the emission of harmful substances into the atmosphere, which are formed in the diesel engine cylinder during fuel combustion. One of the most dangerous of them is nitrogen oxides, the emission of which is regulated by MARPOL requirements. The most effective purification of exhaust gases from nitrogen oxides is provided by catalytic reduction systems. At the same time, due to the use of urea as a reagent in these systems, carbon dioxide emissions increase. This, due to the increase in the greenhouse effect, contributes to global warming. **The purpose** of the study is to determine the optimal operating modes of the ship's catalytic reduction system for marine diesel engines. The optimal ones are understood to be those that ensure a minimal increase in carbon dioxide emissions while maintaining a high level of reduction in nitrogen oxide emissions. **Results.** The studies were carried out on a Gas Carrier class vessel with a displacement of 127,645 tons with two main engines 5X72DF Hyundai-WinGD and three auxiliary engines 6H35DF Hyundai-HiMSEN, the exhaust gases of which were subjected to catalytic reduction. Optimal modes have been experimentally established, in which the relative increase in carbon dioxide emissions does not exceed 2.3% for both types of diesel engines. Nitrogen oxide emissions for 5X72DF Hyundai-WinGD diesel engines do not exceed 3.3 g/(kW·h) and do not exceed 2.4 g/(kW·h) for 6H35DF Hyundai-HiMSEN diesel engines, which meets the requirements of Annex VI of MARPOL. The relative reduction in nitrogen oxide emissions in these modes is 66.7–83.4% for the 5X72DF Hyundai-WinGD diesel engine and 60.8–78.3% for the 6H35DF Hyundai-HiMSEN diesel engine. **Conclusions.** Catalytic reduction systems for marine diesel engines are characterized by the presence of optimal operating modes. It is in these modes that the minimum increase in carbon dioxide emissions is ensured while maintaining a high level of reduction in nitrogen oxide emissions. The coincidence of the values obtained for the low-speed diesel engine 5X72DF Hyundai-WinGD and the medium-speed diesel engine 6H35DF Hyundai-HiMSEN indicates the correctness of the research and the possibility of implementing their results on all types of diesel engines and catalytic reduction systems.

Key words: carbon dioxide emissions, catalytic reduction system, environmental performance, marine diesel, maritime transport, nitrogen oxide emissions.

Вступ. Морський транспорт є суттєвою складовою транспортної інфраструктури будь якої країни, що пов'язана з іншими морськими або океанськими шляхами. Морський транспорт є таким видом транспорту, який виконує багатотисячні (як за масою, так і за кількістю) трансокеанські перевезення вантажів [1; 2]. Подібні об'єми вантажу майже нереально, а в більшості випадків

неможливо виконувати іншими видами транспорту – залізничним та авіаційним. Визначене гарантує постійний подальший розвиток морських перевезень як одного з основних секторів загальних транспортних перевезень [3; 4].

Рух морських транспортних суден неможливий без використання енергетичних установок, найпоширенішим типом яких є двигуни внутрішнього згоряння [5; 6]. Будучи джерелом корисної енергії, судові двигуни внутрішнього згоряння водночас із цим є джерелами шкідливих викидів, які надходять в атмосферу з їх випускними газами [7; 8]. Більшу частину випускних газів скидають небезпечні та нейтральні речовини та з'єднання – водяна пара H_2O , атомарний азот N_2 , незгорілий кисень O_2 . До складу випускних газів входять і токсичні речовини – монооксид вуглецю CO , оксиди сірки SO_x та азоту NO_x [9; 10]. Згоряння палива також супроводжується утворенням діоксиду вуглецю CO_2 , який не є токсичним компонентом випускних газів, але належить до парникових газів та впливає на збільшення парникового ефекту [11; 12].

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Оксиди азоту NO_x відносяться до забруднювальних речовин, яким приділяється найбільша увага з боку міжнародних і національних наглядових організацій та класифікаційних товариств [13; 14]. Це обумовлює актуальність досліджень, що спрямовані на зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах. Основним документом, що регламентує рівень емісії NO_x з випускними газами судових дизелів, є Міжнародна конвенція із запобігання забрудненню з суден МАРПОЛ. Вимоги Додатка VI МАРПОЛ (що в тому числі обмежують значення емісії оксидів азоту) поширюються на всі двигуни, потужність яких перевищує 130 кВт. Максимальна концентрація оксидів азоту NO_x у випускних газах судових дизелів залежить від року побудови судна та частоти обертання вала дизеля [15; 16]. Її значення наведені в табл. 1.

Таблиця 1

**Максимальна концентрація оксидів азоту (NO_x , г/кВт·год)
у випускних газах судових дизелів відповідно
до вимог Додатка VI МАРПОЛ**

Рівень	Частоти обертання вала, об/хв		
	$n < 130$	$130 < n < 2000$	$n > 2000$
Тіер I – для суден, збудованих після 2000 р.	17,0	$45n-0,2$	9,8
Тіер II – для суден, збудованих після 2011 р.	14,4	$44n-0,23$	7,7
Тіер III – для суден, збудованих після 2016 р.	3,4	$9n-0,2$	2,0

Виконання вимог Додатка VI та інших МАРПОЛ контролюється з боку Міжнародної морської організації та імплементовано в національні законодавства у понад 170 країн світу. Це підкреслює актуальність проблеми забезпечення екологічності морських суден, зокрема, у напрямі зниження викидів шкідливих речовин із випускними газами судових дизелів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні судна (термін експлуатації яких не перебільшує 10 років) належать до Тіер III вимог Annex VI MARPOL.

Підтримання необхідного рівня емісії оксидів азоту для подібних суден можливе лише за умови використання додаткових методів очищення випускних газів, які поділяються на первинні та вторинні [17; 18]. Первинні забезпечують створення сприятливих умов, які перешкоджають ланцюговій реакції утворення оксидів азоту під час згоряння палива [19; 20]. Насамперед вони спрямовані на зниження максимальної температури згоряння в циліндрі дизеля. Найпоширенішими з первинних методів є зволоження наддувного повітря, використання водопаливних емульсій, безпосереднє впорскування води в циліндр дизеля, рециркуляція випускних газів. Найбільш поширеним серед вторинних методів зниження емісії оксидів азоту є селективне каталітичне відновлення [21; 22]. Вторинні методи спрямовані на безпосереднє очищення випускних газів від оксидів азоту.

Системи селективного каталітичного відновлення (SCR) є самим ефективним серед всіх інших, що використовуються для зменшення концентрації оксидів азоту у випускних газах [23; 24]. За різними оцінками, вони забезпечують 95–98 % зниження емісії оксидів азоту, що потрапляють до атмосфери з випускними газами суднових дизелів. Саме тому SCR є найпоширенішим зі способів зниження емісії оксидів азоту. Принципову схему очищення випускних газів за допомогою системи SCR наведено на рис. 1.

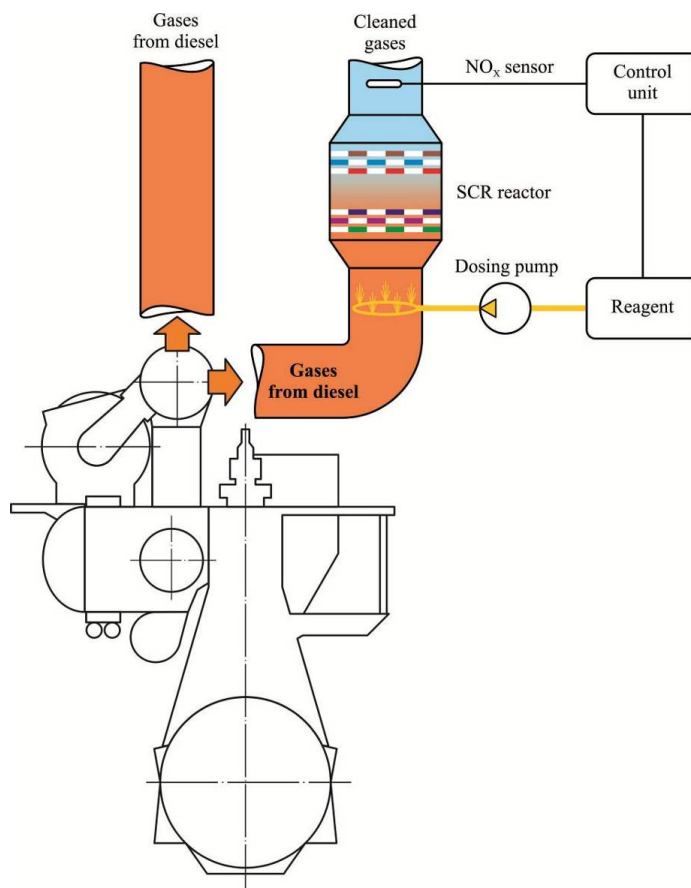
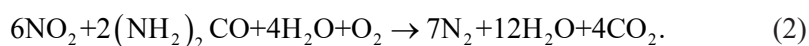
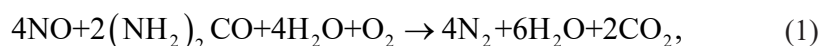


Рис. 1. Очищення випускних газів суднового дизеля за допомогою системи селективного каталітичного відновлення – SCR

Випускні гази суднового дизеля прямують або випускною магістраллю, або через систему SCR. Основним елементом системи є SCR-реактор, саме в ньому відбуваються хімічні реакції, що забезпечують зниження емісії оксидів азоту. У потік випускних газів за допомогою насоса-дозатора впорскується реагент. У стаціонарній енергетиці, автомобільному та залізничному транспорті як реагент зазвичай використовується аміак NH_3 . У системах SCR, що встановлюються на морських судах, як реагент використовується сечовина $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$. Суміш випускних газів і реагенту потрапляє всередину SCR-реактора, де на каталізаторі відбуваються такі реакції:



Це призводить до перетворення монооксиду NO та діоксиду NO₂ азоту в атомарний азот N₂, який з іншими складовими випускних газів потрапляє до атмосфери. Остаточний вміст оксидів азоту у випускних газах контролюється за допомогою NO_x-сенсора, що встановлюється у випускній магістралі поза SCR-реактором. Інформація від NO_x-сенсора потрапляє до контрольного блоку, який забезпечує подачу необхідної кількості реагенту, а саме сечовини, до насоса-дозатора. Сечовина є одноразовим компонентом системи SCR. Вона випаровується в потоці випускних газів, перетворюється в інші речовини, та нова складова випускних газів видаляється до атмосфери. Поповнення судових запасів сечовини виконується під час бункерування судна. Кількість сечовини, що приймається на борт судна (як і кількість палива) розраховується залежно від тривалості навігаційного переходу та можливості поповнення її запасів. Збереження сечовини під час морських переходів здійснюється в спеціальних танках. Підтримання її експлуатаційних характеристик забезпечується циркуляцією між танками, що розміщені поруч один з одним, або в об'ємі одного танку.

Рівняння (1), (2) свідчать, що процес очищення випускних газів від оксидів азоту в SCR-реакторі неминуче пов'язаний з утворенням діоксиду вуглецю CO₂ – газу, який сприяє глобальному потеплінню та є одним із визначальних під час оцінки парникового ефекту. На цей час рівень концентрації діоксиду вуглецю у випускних газах судових дизелів не регламентується вимогами міжнародних або національних конвенцій. При цьому постійно впроваджуються заходи, спрямовані на зменшення викидів CO₂. Таким чином, використання SCR як методу, що забезпечує максимальне зниження емісії оксидів азоту, призводить до підвищення емісії іншої негативної складової випускних газів – діоксиду вуглецю [25; 26].

Водночас слід зазначити, що до комплексної назви «оксиди азоту», крім раніше вказаних монооксиду азоту NO та діоксиду азоту NO₂ (які належать до канцерогенних речовин), входить також закис азоту N₂O. Відсотковий внесок цієї речовини до загальної кількості оксидів азоту значно менший, ніж NO та NO₂, але саме закис азоту N₂O належить до парникових газів і володіє потенціалом глобального потепління, що майже в 300 разів перевищує аналогічний показник

для діоксиду вуглецю CO₂. На сьогодні вимоги MARPOL не поділяють оксиди азоту на складові компоненти та регламентують саме їх комплекс, тобто загальну кількість. При цьому слід враховувати не лише їх канцерогенні властивості, але і їх здатність до підвищення парникового ефекту.

Формулювання цілей статті. У зв'язку з вищевикладеним метою дослідження є визначення оптимальних режимів роботи суднової системи SCR. При цьому під оптимальними розуміються такі, за яких забезпечується мінімальне підвищення емісії діоксиду вуглецю з одночасним підтриманням високого рівня зниження емісії оксидів азоту.

Виклад основного матеріалу. Дослідження виконувалися на судні класу Gas Carrier водотоннажністю 127 645 тонн. Як головні двигуни на судні було встановлено два однотипні малообертові дизелі 5X72DF Hyundai-WinGD. Як допоміжні – три однотипні середньообертові дизелі 6H35DF Hyundai-HiMSEN.

Конструкційна вдосконаленість дизелів (як головних, так і допоміжних) і організація робочого циклу, що перебігає у їх циліндрах, забезпечувала вимоги Tier II MARPOL, тому не потребувала додаткових технічних заходів щодо зменшення емісії оксидів азоту. Під час перебування судна в спеціальних екологічних районах його екологічні показники (насамперед щодо концентрації оксидів азоту у випускних газах) відповідали вимогам Tier III MARPOL. Це досягалося за допомогою системи SCR. При цьому кожний із двох головних двигунів 5X72DF Hyundai-WinGD та кожний з трьох допоміжних двигунів 6H35DF Hyundai-HiMSEN були обладнані окремим SCR-реактором.

Основні складові системи SCR наведено на рис. 2 у вигляді скріншота інформаційної панелі управління судновими дизелями 5X72DF Hyundai-WinGD та 6H35DF Hyundai-HiMSEN. Візуалізація цих даних здійснюється програмним забезпеченням і доступна на загальному комп'ютерному комплексі центрального поста управління.

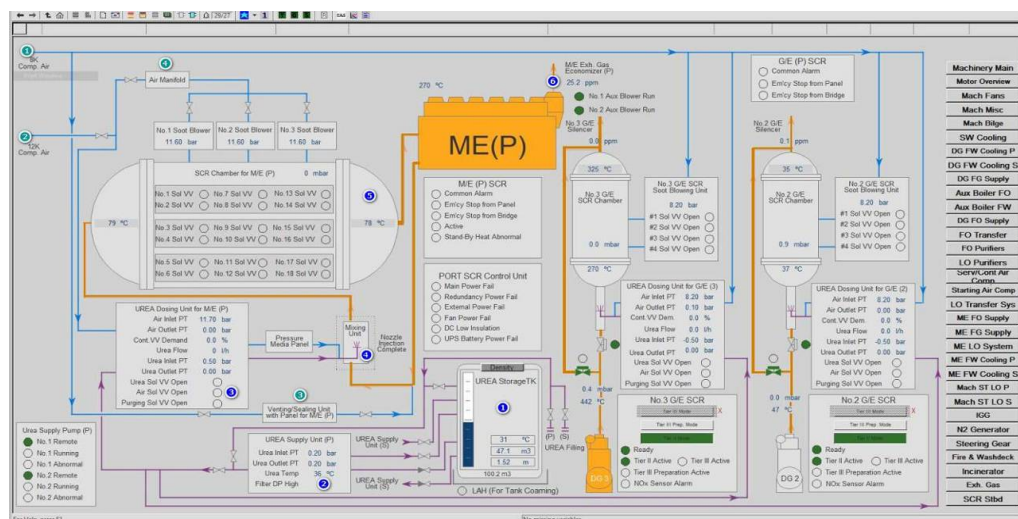


Рис. 2. Основні складові системи SCR головного 5X72DF Hyundai-WinGD та допоміжних двигунів 6H35DF Hyundai-HiMSEN судна класу Gas Carrier водотоннажністю 127 645 тонн

Дослідження виконувалися на режимах, що відповідають навантаженню 25, 50, 75 та 100 % на головні двигуни 5X72DF Hyundai-WinGD та на допоміжні двигуни 6H35DF Hyundai-HiMSEN. Під час досліджень головні двигуни 5X72DF Hyundai-WinGD працювали з однаковою потужністю кожний на свій гвинт. Також однакова потужність підтримувалася на допоміжних двигунах 6H35DF Hyundai-HiMSEN у разі їх паралельної роботи.

Цикл випробувань починався з експлуатаційного режиму, що відповідає навантаженню 25 %, та ступінчасто змінювався на 50 % та далі на 75 % і на 100 %. Основні показники, визначенню яких присвячені дослідження, – це концентрація діоксиду вуглецю CO_2 та оксидів азоту NO_x у випускних газах. Фіксація цих показників виконувалася лише на сталих режимах роботи дизелів, які визначалися незмінними протягом як мінімум 30 хвилин: температури випускних газів, температури охолоджувальної води, температури циркуляційного мастила, максимального тиску згоряння, тиску наприкінці стиснення, середнього індикаторного тиску [27–30].

У системах SCR на кожному з навантажень на дизелі 5X72DF Hyundai-WinGD та 6H35DF Hyundai-HiMSEN дослідження виконувалися за умови 75, 80, 85, 90, 95 та 100 % подачі сечовини. Тривалість експлуатації дизелів та їх систем SCR на кожному з режимів становила 0,5–1,0 год. Це забезпечувало рівномірність теплових і динамічних навантажень, а також сталість контрольованих показників. Після цього проміжку часу виконувалася фіксація значень емісії діоксиду вуглецю CO_2 та оксидів азоту NO_x . Отримані в такий спосіб значення наведені у вигляді діаграм – рис. 3, 4.

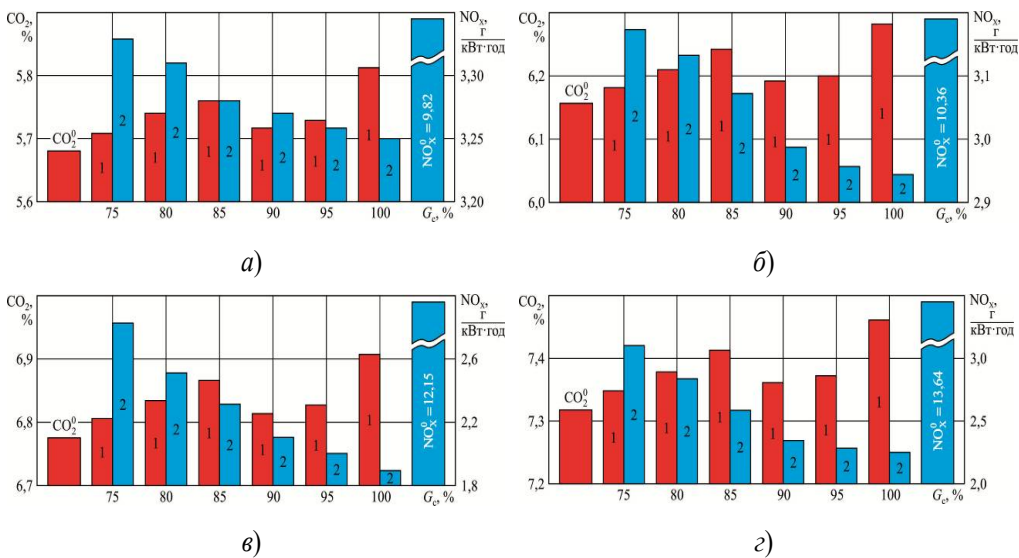


Рис. 3. Зміна емісії діоксидів вуглецю CO_2 та оксидів азоту NO_x під час використання системи HP-SCR на дизелі 5X72DF Hyundai-WinGD: а – навантаження 25 %; б – навантаження 50 %; в – навантаження 75 %; д – навантаження 100 % (CO_2^0 , NO_x^0 – емісія без використання SCR, G_c – відносна витрата сечовини)

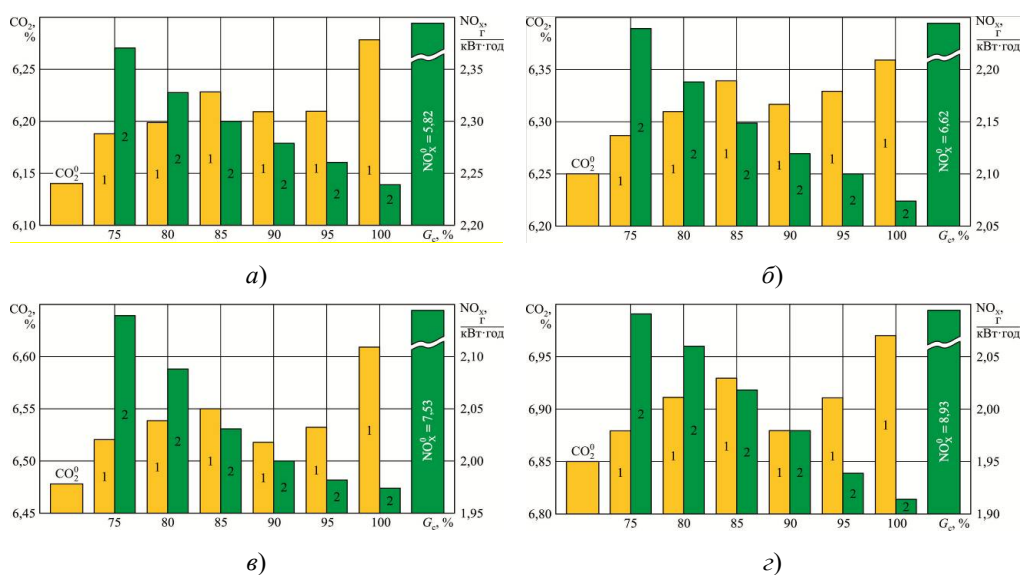


Рис. 4. Зміна емісії діоксидів вуглецю CO₂ та оксидів азоту NO_x під час використання системи LP-SCR на дизелі 6H35DF Hyundai-HiMSEN: a – навантаження 25 %; b – навантаження 50 %; b – навантаження 75 %; d – навантаження 100 % (CO₂⁰, NO_x⁰ – емісія без використання SCR, G_c – відносна витрата сечовини)

Визначимо, що обидва компоненти, які входять до складу випускних газів – діоксид вуглецю CO₂ та оксиди азоту NO_x – створюють негативний вплив на довкілля. Підвищення витрат сечовини пропорційно знижує рівень емісії оксидів азоту, але при цьому рівень емісії діоксиду вуглецю змінюється за нелінійною залежністю. Саме тому для визначення оптимальних режимів експлуатації системи SCR потрібне синергетичне рішення залежностей $CO_2 = f(G_c) \cap NO_x = f(G_c)$.

Висновки. Експериментальними дослідженнями, що виконувались у системах SCR суднового малообертового дизеля 5X72DF Hyundai-WinGD та суднового середньообертового дизеля 6H35DF Hyundai-HiMSEN, встановлено таке.

1. Сечовина як реагент, що використовується в системах SCR, сприяє збільшенню емісії діоксидів вуглецю на всіх експлуатаційних режимах роботи дизелів.

Відносне збільшення емісії CO₂ для дизеля 5X72DF Hyundai-WinGD залежно від відносної витрати сечовини (що змінювалась у діапазоні 75–100 %) становить 0,41–2,29 %. Ця залежність не є лінійною та у випадку 90–95 % витрати сечовини становить:

- під час 25 % навантаження на дизель – 0,70–0,88 %;
- під час 50 % навантаження на дизель – 0,65–0,81 %;
- під час 75 % навантаження на дизель – 0,59–0,74 %;
- під час 100 % навантаження на дизель – 0,55–0,68 %.

Відносне збільшення емісії CO₂ для дизеля 6H35DF Hyundai-HiMSEN залежно від відносної витрати сечовини (що змінювалась у діапазоні 75–100 %) становить 0,44–2,28 %.

У випадку 90–95 % витрати сечовини збільшення емісії CO₂ становить:

- під час 25 % навантаження на дизель – 1,14–1,16 %;
- під час 50 % навантаження на дизель – 1,12–1,28 %;
- під час 75 % навантаження на дизель – 0,62–0,77 %;
- під час 100 % навантаження на дизель – 0,44–0,88 %.

2. Збільшення витрати сечовини в діапазоні 75–100 % сприяє зменшенню емісії оксидів азоту на всіх експлуатаційних режимах роботи дизелів.

Для суднового дизеля 5X72DF Hyundai-WinGD використання системи SCR забезпечує зниження емісії оксидів азоту ΔNO_x на 66,1–83,8 %. При цьому для всіх навантажень на дизель (що змінювались у діапазоні 25–100 %) найбільш ефективними є режими, що відповідають 90–100 % відносної витрати сечовини.

Для суднового дизеля 6H35DF Hyundai-HiMSEN використання системи SCR забезпечує зниження емісії оксидів азоту ΔNO_x на 59,3–78,6 %. Для 25–100 % навантаження на дизель найбільше зниження емісії оксидів азоту спостерігається на режимах, що відповідають 90–100 % відносної витрати сечовини.

3. Зазначене свідчить про наявність оптимальних режимів роботи системи селективного каталітичного відновлення випускних газів суднових дизелів, які визначаються експериментально для кожного з дизелів. За результатами проведених досліджень найбільш оптимальними (з погляду мінімального підвищення емісії діоксиду вуглецю з одночасним підтриманням високого рівню зниження емісії оксидів азоту) є режими експлуатації системи SCR, на яких до контуру реактора подається 90 % відносної витрати сечовини. За цих умов спостерігається мінімальне підвищення емісії діоксиду вуглецю порівняно з режимами експлуатації суднових дизелів без використання системи SCR. Водночас рівень емісії оксидів азоту за цих обставин відповідає вимогам Tier III MARPOL.

4. Збіг отриманих значень для малообертового дизеля 5X72DF Hyundai-WinGD та середньообертового дизеля 6H35DF Hyundai-HiMSEN свідчить про коректність проведення досліджень і можливості імплементації їх результатів на всіх типи дизелів та систем SCR.

5. Подальші дослідження будуть спрямовані на визначення впливу сечовини (як основного реагенту в системі SCR) на зміну кожної з найбільш небезпечних складових оксидів азоту – монооксиду азоту NO, діоксиду азоту NO₂ та закису азоту N₂O.

ЛІТЕРАТУРА

1. Varbanets R., Fomin O., Pištěk V., Klymenko V., Minchev D., Khrulev A., Zalozh V., Kučera P. Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9 (3). P. 321. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.
2. Petrychenko O., Levinskyi M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport. *Sustainability*. 2025. Vol. 17. P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.

3. Сагін С. В., Суворов П. С., Бондар С. А. Розробка методу оцінки ризиків виникнення аварійних подій під час експлуатації дизелів морських суден. *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* 2023. Вип. 47. С. 122 - 130. DOI: 10.31653/smf47.2023.122-130.
4. Sagin A.S., Zablotskyi Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal.* 2021. No. 7–8. P. 14–17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
5. Sagin S., Kuropyatnyk O., Matieiko O., Razinkin R., Stoliaryk T., Volkov O. Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel. *Journal of Marine Science and Engineering.* 2024. Vol. 12. 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.
6. Varbanets R., Shumylo O., Marchenko A., Minchev D., Kyrnats V., Zalozh V., Aleksandrovskaya N., Brusnyk R., Volovyk K. Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines. *Polish maritime research.* 2022. Vol. 29 (4). P. 88–96. <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
7. Kuropyatnyk O.A. Reduction of NO_x emission in the exhaust gases of low-speed marine diesel engines. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, Vienna-2018.* No. 7–8. P. 37–42. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-37-42.
8. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences.* 2021. No. 7–8. P. 36–43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
9. Сагін С. В., Побережний Р. В. Аналіз основних способів зниження емісії оксидів азоту дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2022. Вип. 44. С. 132–141. DOI: 10.31653/smf44.2022.132-141.
10. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2022. Вип. 45. С. 5–16. DOI: 10.31653/smf45.2022.5-16.
11. Побережний Р. В., Сагін С. В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 41. С. 5–9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
12. Zablotskyi Yu.V., Sagin A.S. Applying of fuel additives in marine diesel engines. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2021. Вип. 43. С. 5–17. DOI: 10.31653/smf343.2021.5-17.
13. Заблоцький Ю. В. Підвищення економічності роботи суднових дизелів. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 40. С. 12–16. DOI: 10.31653/smf340.2020.12-16.
14. Petrychenko O., Levinskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport.

- Transport Systems and Technologies*. 2024. Vol. 43. P. 21–36. DOI: 10.32703/2617-9059-2024-43-2.
15. Сагін С. В., Мадей В. В., Сагін А. С. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі. *Автоматизація суднових технічних засобів : наук.-техн. зб.* 2021. Вип. 27. С. 93–107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.
 16. Сагін С. В., Куропятник О. А. Визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами суднових дизелів. *Водний транспорт. Зб. наук. праць* 2024. Вип. 2 (40). С. 173–185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
 17. Заблоцький Ю. В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок. *Вісник Одеського національного морського університету : зб. наук. праць*. 2020. № 2 (62). С. 106–119. DOI: 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.
 18. Марченко О. О., Сагін С. В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 41. С. 10–14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
 19. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2021. No. 7–8. P. 36–43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
 20. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines. *Technology Audit and Production Reserves*. 2023. No. 5 (1 (73)). P. 37–43. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.
 21. Руснак Д. Ю., Сагін С. В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив. *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 40. С. 49–54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
 22. Сагін С. В., Сагін А. С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2023. Вип. 46. С. 118–131. DOI: 10.31653/smf46.2023.118-131.
 23. Сагін С. В., Мадей В. В., Сагін С. С., Чимшир В. І., Разінкін Р. О. Аналіз екологічної стійкості та енергетичної ефективності використання скрубєрного очищення випускних газів дизелів суден морського транспорту. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2023. Вип. 47. С. 157–171. DOI: 10.31653/smf47.2023.157-171.
 24. Сагін С. В., Куропятник О. А. Визначення оптимальних режимів експлуатації суднових двигунів внутрішнього згоряння під час використання біодизельного палива. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2024. Вип. 48. С. 100–113. DOI: 10.31653/smf48.2024.100-113.
 25. Сагін С. С., Сагін С. В. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден. *Водний транспорт :*

- зб. наук. праць. 2024. Вип. 1 (39). С. 215–225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
26. Сагін С. В., Бондар С. А. Метод попередження аварійних ситуацій під час експлуатації суднових дизелів за аналізом потоку відмов його основних вузлів. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2023. Вип. 46. С. 101–109. DOI: 10.31653/smf46.2023.101-109.
27. Сагін С. В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2018. Вип. 38. С. 132–142.
28. Сагін С. В., Столярик Т. О. Динаміка суднових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками. *Автоматизація суднових технічних засобів : наук.-техн. зб.* 2021. Вип. 27. С. 108–119.
29. Заблоцький Ю. В., Сагін А. С. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури суднових дизелів. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2022. Вип. 44. С. 121–131. DOI: 10.31653/smf44.2022.121-131.
30. Зверьков Д. О., Сагін С. В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 41. С. 20–25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.

REFERENCES

1. Varbanets, R., Fomin, O., Píštěk, V., Klymenko, V., Minchev, D., Khrulev, A., Zalozh, V., Kučera, P. (2021). Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9 (3). 321. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.
2. Petrychenko, O., Levinskyi, M., Goolak, S., Lukoševičius, V. (2025). Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport. *Sustainability*, 17, 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
3. Sagin, S.V., Suvorov, P.S., Bondar, S.A. (2023). Rozrobka metodu ocinki rizikiv vineknenya avariinih podii pid chas eksplyatacii dizeliv morskih suden. *Ship power plants*, 47, 122–130. DOI: 10.31653/smf47.2023.122-130.
4. Sagin, A.S., Zablotskyi, Yu.V. (2021). Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 7–8, 14–17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
5. Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Matieiko, O., Razinkin, R., Stoliaryk, T., Volkov O. (2024). Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12, 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.
6. Varbanets, R., Shumylo, O., Marchenko, A., Minchev, D., Kyrnats, V., Zalozh, V., Aleksandrovska, N., Brusnyk, R., Volovyk, K. (2022).

- Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines. *Polish maritime research*, 29 (4), 88–96. <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
7. Kuropyatnyk, O.A. (2018). Reduction of NO_x emission in the exhaust gases of low-speed marine diesel engines. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 7–8, 37–42.
 8. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. (2021). Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 7–8, 36–43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
 9. Sagin, S.V., Poberezhniy, R.V. Analiz osnovnich sposobiv znizhenya emisii oksidiv azotu dizeliv suden morskogo ta vnutrishnego vodnogo transportu. (2022). *Ship power plants*, 44, 132–141. DOI: 10.31653/smf44.2022.132-141.
 10. Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Tkachenko, I. (2022). Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships. *Ship power plants*, 45, 5–16. DOI: 10.31653/smf45.2022.5-16.
 11. Poberezhniy, R.V., Sagin, S.V. (2020). Zabezpechenya ekologichnykh pokaznikov dizeliv suden richkovogo ta morskogo transport. *Ship power plants*, 41, 5–9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
 12. Zablotskyi, Yu.V., Sagin, A.S. (2021). Applying of fuel additives in marine diesel engines. *Ship power plants*, 43, 5–17. DOI: 10.31653/smf343.2021.5-17.
 13. Zablotskyi, Yu.V. (2020). Pidvishenya ekonomichnosti roboti sudnovih dizeliv. *Ship power plants*, 40, 12–16. DOI: 10.31653/smf340.2020.12-16.
 14. Petrychenko, O., Levinskyi, M. (2024). Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport. *Transport Systems and Technologies*, 43, 21–36. DOI: 10.32703/2617-9059-2024-43-2.
 15. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, A.S. (2021). Robota sudnovogo dizelya na biodizelnom palivi. *Automation of ship technical facilities*, 27, 93–107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.
 16. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. (2024). Vznacheniya optimalnih rezhimiv procesiv upravlinnya vipusknimi gazami sudnovih duzeliv. *Water transport*, 2 (40), 173–185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
 17. Zablotskyi, Yu.V. (2020). Pidvishenya palivnoi ekonomichnosti sudnovih dizelnih ustanovok. *Visnik Odeskogo nacionalnogo morskogo universitetu*. 2, 106–119. DOI: 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.
 18. Marchenko, O.O., Sagin, S.V. (2020). Vdoskonalenya procesu ochisheniya sudnovih vazhkih paliv. *Ship power plants*, 41, 10–14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
 19. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. (2021). Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 7–8, 36–43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

20. Sagin, S., Sagin, A. (2023). Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines. *Technology Audit and Production Reserves*, 5 (1(73)), 37–43. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.
21. Rusnak, D.Y., Sagin, S.V. (2020). Zabezpechena ekologichnich vumog pri ultrazvukovii desulphurizacii vuglevodnich paliv. *Ship power plants*, 40, 49–54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
22. Sagin, S.V., Sagin, A.S. (2023). Control ta diagnostuvanya nadiinosti ta ekonomichnosti dizeliv morskih ta richkovih zasobiv transportu. *Ship power plants*, 46, 118–131. DOI: 10.31653/smf46.2023.118-131.
23. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, S.S., Chimshir, V.I., Razinkin, R.O. (2023). Analiz ekologichnoi stiicosti ta energetichnoi efectivnosti vicoristanya scrubernogo ochishenya vipusknych gaziv dizeliv sudden morskogo transportu. *Ship power plants*, 47, 157–171. DOI: 10.31653/smf47.2023.157-171.
24. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. (2024). Vznacheniya optimalnih rezhimiv ekspluatacii sudnovih dviguniv vnutrashnogo zgoryannya pid chas vikoristannya biodizelnogo paliva. *Ship power plants*, 48, 100–113. DOI: 10.31653/smf48.2024.100-113.
25. Sagin, S.S., Sagin, S.V. (2024). Vicoristanya shtuchnogo intelektu v situaciyah nadmirmogo zblizhenya suden. *Water transport*, 1 (39), 215–225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
26. Sagin, S.V., Bondar, S.A. (2023). Metod poperedzhenya avariinih situacii pid chas ekspluatacii sudnovih dizeliv za analizom potocu vidmov iogo osnovnih vuzliv. *Ship power plants*, 46, 101–109. DOI: 10.31653/smf46.2023.101-109.
27. Sagin, S.V. (2018). Znizhenya energetichnih vtrat v precizionih parah palivnoi aparaturi sudnovih dizeliv. *Ship power plants*, 38, 132–142.
28. Sagin, S.V., Stolyaryk, T.O. (2021). Dinamika sudnovih dizeliv pid chas vikoristanya motornich mastil z rizmimi structurnimi karakteristikami. *Automation of ship technical facilities*, 27, 108–119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
29. Zablotskyi, Yu.V., Sagin, A.S. (2022). Vznacheniya dunamichnih navantazhen pid chas zmini rezhimiv mashchennya preciziinich par palivnoi aparaturi sudnovih dizeliv. *Ship power plants*, 44, 121–131. DOI: 10.31653/smf44.2022.121-131.
30. Zverkov, D.O., Sagin, S.V. (2020). Znizhenya mechanichnih vtrat u sudnovih dizelyach. *Ship power plants*, 41, 20–25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.

Дата першого надходження рукопису до видання: 24.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 27.08.2025

Дата публікації: 30.10.2025

ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ НИЗЬКОГО ТИСКУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

С.В. Сагін¹, О.А. Куропятник²

¹ д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри суднових енергетичних установок,
Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-8742-2836

² д-р філософії, докторант кафедри суднових енергетичних установок,
Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна,
ORCID ID: 0009-0008-2565-5771

Анотація

Вступ. Ефективність експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту визначається не лише отриманням економічного прибутку від транспортування вантажів або забезпечення відпочинку пасажирів, але й рівнем негативного впливу з боку суден та їх енергетичних установок на довкілля. Одним із найбільш забруднювальних компонентів, що потрапляють від теплових двигунів суднових енергетичних установок до довкілля, є випускні гази. До складу випускних газів суднових дизелів разом із нейтральними та небезпечними складовими входять токсичні речовини, у тому числі оксиди азоту, емісія яких регламентується відповідно до вимог Додатка VI MARPOL. З метою зниження емісії оксидів азоту використовуються різні методи, найпоширенішим з яких є рециркуляція випускних газів. **Мета** дослідження полягала у визначенні впливу рециркуляції випускних газів на екологічні показники судового дизеля. **Результати.** Розглянуто питання щодо забезпечення екологічних показників суднових дизелів шляхом використання систем рециркуляції випускних газів низького тиску. Висвітлено особливості систем рециркуляції випускних газів низького тиску, що встановлюються на суднових малооберткових дизелях високої потужності. Саме в цих системах деяка частина випускних газів після газотурбокомпресора повертається в циліндр судового дизеля, сприяє через це зменшенню температури під час згоряння палива. Наведені результати досліджень, що виконувалися на судовому малообертковому дизелі 7UEC60LS фірми Mitsubishi, обладнаному системою рециркуляції випускних газів низького тиску зі ступенем рециркуляції 5...20 %. При цьому визначався вплив ступеню рециркуляції на емісію оксидів азоту та температуру випускних газів дизеля. **Висновки.** Експериментально встановлено, що зміна ступеня рециркуляції випускних газів у діапазоні 5...20 % забезпечує зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах на 3,8...30,7 % залежно від навантаження дизеля. Також виявлено, що використання системи рециркуляції випускних газів низького тиску призводить до підвищення температурних навантажень на циліндрову групу та газовипускную систему судового дизеля.

Ключові слова: екологічні показники, емісія оксидів азоту, морський транспорт, система рециркуляції випускних газів низького тиску, судовий дизель, температурне навантаження.

USING A LOW-PRESSURE EXHAUST GAS RECIRCULATION SYSTEM TO
ENSURE THE ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF MARINE DIESEL
ENGINES

S.V. Sagin¹, O.A. Kuropyatnyk²

¹ Dr. of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Ship Power Plants,
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-8742-2836

² PhD, Doctoral Student of the Department of Ship Power Plants,
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0008-2565-5771

Summary

Introduction. *The efficiency of operation of sea and inland waterway vessels is determined not only by obtaining economic profit from transporting goods or providing recreation for passengers, but also by the level of negative impact of vessels and their power plants on the environment. One of the most polluting components that enter the environment from thermal engines of ship power plants is exhaust gases. The exhaust gases of ship diesel engines, along with neutral and hazardous components, include toxic substances, including nitrogen oxides, the emission of which is regulated in accordance with the requirements of Annex VI of MARPOL. In order to reduce the emission of nitrogen oxides, various methods are used, the most common of which is exhaust gas recirculation. **The purpose** of the study was to determine the impact of exhaust gas recirculation on the environmental performance of ship diesel engines.*

Results. *To consider the issue of ensuring the environmental performance of ship diesel engines by using low-pressure exhaust gas recirculation systems. The features of low-pressure exhaust gas recirculation systems installed on high-power low-speed marine diesel engines are highlighted. It is in these systems that some of the exhaust gases after the gas turbocharger are returned to the cylinder of the marine diesel engine, thereby contributing to a decrease in temperature during fuel combustion. The results of research carried out on a low-speed marine diesel engine 7UEC60LS from Mitsubishi, equipped with a low-pressure exhaust gas recirculation system with a recirculation degree of 5...20 %, are presented. The influence of the recirculation degree on the emission of nitrogen oxides and the temperature of diesel exhaust gases was determined.*

Conclusions. *It was experimentally established that changing the degree of exhaust gas recirculation in the range of 5...20 % provides a decrease in the concentration of nitrogen oxides in exhaust gases by 3.8...30.7 %, respectively, depending on the load of the diesel engine. It was also found that the use of a low-pressure exhaust gas recirculation system leads to an increase in temperature loads on the cylinder group and exhaust system of a marine diesel engine.*

Key words: *environmental performance, low-pressure exhaust gas recirculation system, marine diesel engine, maritime transport, nitrogen oxide emissions, temperature load.*

Вступ. Морський і внутрішній водний транспорт є суттєвою складовою економіки будь-якої країни, територія якої з'єднується з іншими водними шляхами. Корисна транспортна робота, яка забезпечується під час перевезення вантажу або пасажирів, пов'язана з неминучим утворенням шкідливих викидів із випускними газами теплових двигунів (насамперед дизелів як найпоширеніших генераторів механічної енергії, що встановлюються на судах морського та внутрішнього водного транспорту) [1–3]. Ефективність експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту визначається не лише отриманням економічного прибутку від транспортування вантажів або забезпечення відпочинку пасажирів, але й рівнем негативного впливу з боку суден та їх енергетичних установок на довкілля. Одним із найбільш забруднювальних компонентів, що потрапляють від теплових двигунів судових енергетичних установок до довкілля, є випускні гази. До складу випускних газів судових дизелів разом із нейтральними та небезпечними складовими входять токсичні речовини, у тому числі оксиди азоту, які в атмосфері перетворюються в азотну кислоту та повертаються на водну або земну поверхню у вигляді кислотних дощів.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Важливість розв'язання завдань щодо забезпечення екологічних показників суден морського та внутрішнього водного транспорту під час експлуатації двигунів внутрішнього згоряння визначається вимогами Додатка VI MARPOL, яким (у тому числі) обмежуються рівень емісії оксидів азоту з випускними газами. Зниження емісії оксидів азоту забезпечується первинними та вторинними методами [4–6]. Первинні впливають на процес утворення оксидів азоту в циліндрі дизеля, вторинні забезпечують очищення випускних газів від оксидів азоту. Основною метою первинних методів є зниження температури в циліндрі дизеля під час згоряння палива менш за 1500 °C – саме за цієї температури відбувається ланцюгова та некерована реакція утворення оксидів азоту. Будь-який із способів підтримання екологічних показників роботи судових дизелів (щодо емісії оксидів азоту) не може бути визначено аналітично. Це пов'язано з різними характеристиками судових дизелів, різноманітністю їх експлуатаційних режимів, а також різним структурним і фракційним складом палива, що в них використовується. Тому найбільш ефективним способом визначення оптимального режиму систем, що забезпечують підтримання екологічних показників судових дизелів, є проведення експериментальних досліджень

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із способів підтримання емісії NO_x у межах, що відповідають цим вимогам, є використання систем керування випускними газами, яке (у більшості випадків) виконується шляхом їх рециркуляції, під час якої частину випускних газів повертають до циліндру дизеля [7; 8]. При цьому у випадку, коли випускні гази спрямовують до циліндра після газотурбонагнітача (тобто коли вони втратили більшу частину енергії та тиску на лопатках газової турбіни), системи рециркуляції називають системами низького тиску [9; 10]. У разі, коли випускні гази повертають до циліндра ще до їхнього потрапляння на лопатки газотурбонагнітача (тобто коли вони ще характеризуються тиском, з яким виходять із випускного колектора), системи

рециркуляції називають системами високого тиску [11; 12]. Обидві системи використовуються на дизелях суден морського транспорту та встановлюються незалежно від призначення або потужності дизеля [13; 14].

Переваги системи рециркуляції низького тиску:

- проста конструкція газоходів і скрубера, зважаючи на порівняно низький тиск і низьку температуру випускних газів (порівняно із системою рециркуляції високого тиску) [15–17];
- низька потужність додаткового газового нагнітача з огляду на те, що випускні гази під час рециркуляції спрямовуються не в продувний ресивер дизеля (як у системі рециркуляції високого тиску), а в компресор газотурбонагнітача [18–20].

При цьому компоненти системи низького тиску мають більші геометричні розміри, ніж у системі високого тиску (у зв'язку з тим, що за умови низького тиску випускних газів пропорційно збільшується їх об'єм).

Система рециркуляції високого тиску (порівняно із системою низького тиску) відрізняється більшою компактністю – високий тиск сприяє меншому питомому об'єму випускних газів [21; 22]. Однак з огляду як на високий тиск, так і на високу температуру газів, скрубер, що забезпечує їх очищення, зазнає великі температурні й гідравлічні навантаження, тому має більш складну конструкцію. Крім того, оскільки в системі рециркуляції високого тиску випускні гази надходять безпосередньо в ресивер продувного повітря, потужність газового нагнітача повинна забезпечувати такий самий високий тиск, як і основний повітряний компресор газотурбонагнітача [23; 24]. Також потрібно зазначити, що висока температура випускних газів зобов'язує використовувати додатковий охолоджувач, це ускладнює конструкцію системи рециркуляції високого тиску [25; 26].

У системах рециркуляції низького й високого тиску кількість випускних газів, що повертаються до циліндра дизеля, може досягати 25...30 % від їх загального обсягу [27; 28].

Формулювання цілей статті. У зв'язку з вищевикладеним метою дослідження було визначено впливу системи рециркуляції випускних газів низького тиску на основні експлуатаційні показники роботи судових дизелів та визначення її найбільш раціональних режимів експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Дослідження виконувалися на судовому малообертовому дизелі 7UEC60LS фірми Mitsubishi, обладнаному системою рециркуляції випускних газів низького тиску. Дизелебудівна корпорація Mitsubishi Heavy Industries Ltd. є однією з перших світових фірм, які почали встановлювати системи рециркуляції випускних газів на морські судна.

Принципову схему дизеля 7UEC60LS фірми Mitsubishi із системою рециркуляції випускних газів низького тиску (Low pressure Exhaust Gas Recirculation – LP-EGR) показано на рис. 1.

Функціонування системи рециркуляції відбувається таким чином. Випускні гази із циліндрів дизеля 10 надходять у загальний випускний колектор 2 і далі до газотурбонагнетачів 1 і 5, після чого через газовипускну трубу видаляються в атмосферу. Газотурбонагнітачі 1 і 5 забирають повітря з машинного відділення і після стиснення спрямовують його через охолоджувачі 12 і 9 у повітряний

(продувний) ресивер 11. При цьому газотурбонагнетач 5 обладнаний системою рециркуляції випускних газів низького тиску, яка складається з керуючого клапана 3, скрубера очищення газів 4, газового нагнітача 8, водяної цистерни 7 і водяного насоса 6. У разі використання системи рециркуляції випускних газів їх кількість регулюється клапаном 3. Випускні гази очищуються й попередньо охолоджуються в скрубєрі 4, після чого додатковим нагнітачем 8 спрямовуються до охолоджувача 9 та разом зі свіжим повітрям надходять до повітряного ресивера 11 і далі в циліндри дизеля 10.

Експериментальні дослідження з визначення емісії NO_x у випускних газах виконувалися відповідно до вимог Технічного кодексу з контролю за викидами окислів азоту із суднових дизельних двигунів, згідно з яким дослідження проводилися за випробувальним циклом ЕЗ (що застосовується до головних і допоміжних двигунів, які працюють за гвинтовою характеристикою) [29–31]. Режими роботи дизеля задавалися частотою обертання колінчастого вала, яка визначалася положенням паливної рейки.

Експерименти виконувалися за умови стабілізації зовнішніх збурень і навантажень для швидкісних режимів роботи, що відповідали значенням відносної потужності дизеля: $0,6N_{\text{еном}}$, $0,7N_{\text{еном}}$, $0,8N_{\text{еном}}$ і $0,9N_{\text{еном}}$, де $N_{\text{еном}}$ – номінальна тривала потужність дизеля.

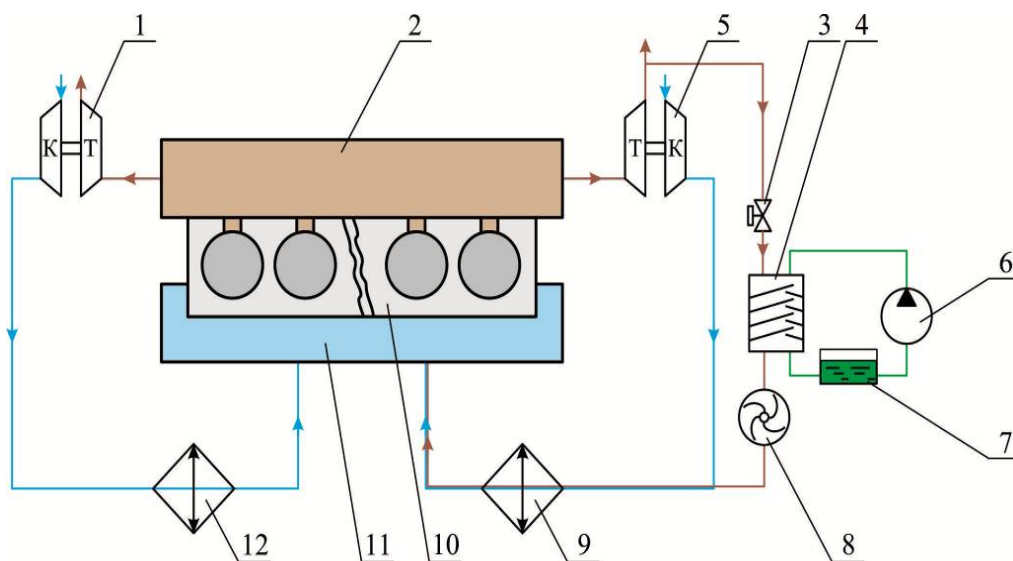


Рис. 1. Принципова схема системи рециркуляції випускних газів низького тиску суднового малообертового дизеля 7UEC60LS фірми Mitsubishi:

- 1, 5 – газотурбонагнітач; 2 – випускний колектор; 3 – керуючий клапан системи рециркуляції випускних газів високого тиску; 4 – скрубєр;
6 – насос подачі прісної води в систему очищення й охолодження випускних газів;
7 – цистерна прісної води системи очищення й охолодження випускних газів;
8 – допоміжний газовий нагнітач з електричним приводом; 9, 12 – охолоджувач наддувального повітря; 10 – судновий дизель; 11 – продувний ресивер;
Т, К – газова турбіна та повітряний компресор газотурбонагнітачів

Випробування проводилися під час зниження потужності дизеля, починаючи з максимально можливої за умови чистого корпусу судна. Зниження частоти обертання здійснювалося приблизно на один оберт кожні п'ять хвилин, що забезпечувало рівномірну зміну теплового режиму роботи дизеля. При цьому на кожному з досліджуваних режимів дизель попередньо працював протягом 30...45 хвилин, що гарантувало рівномірний розподіл теплових і масових потоків, після чого виконувалася фіксація необхідних параметрів. Під час досліджень дизель працював на тому самому сорті палива й циліндрового мастила. Також постійними підтримувалися значення охолоджувальних середовищ на вході / виході дизеля (води та циркуляційного мастила). Результати досліджень відображені на рис. 2.

Відносне зменшення емісії оксидів азоту NO_x на кожному з режимів визначалося за виразом

$$\Delta \text{NO}_x = \frac{\text{NO}_x^0 - \text{NO}_x^i}{\text{NO}_x^0} \cdot 100, \%,$$

де NO_x^0 – концентрація оксидів азоту у випадку, коли $\text{EGR} = 0 \%$;

NO_x^i – концентрація оксидів азоту для інших значень ступеня рециркуляції EGR (5, 10, 15, 20 %).

Відносне зменшення емісії оксидів азоту з випускними газами під час використання системи HP-EGR наведено на рис. 3.

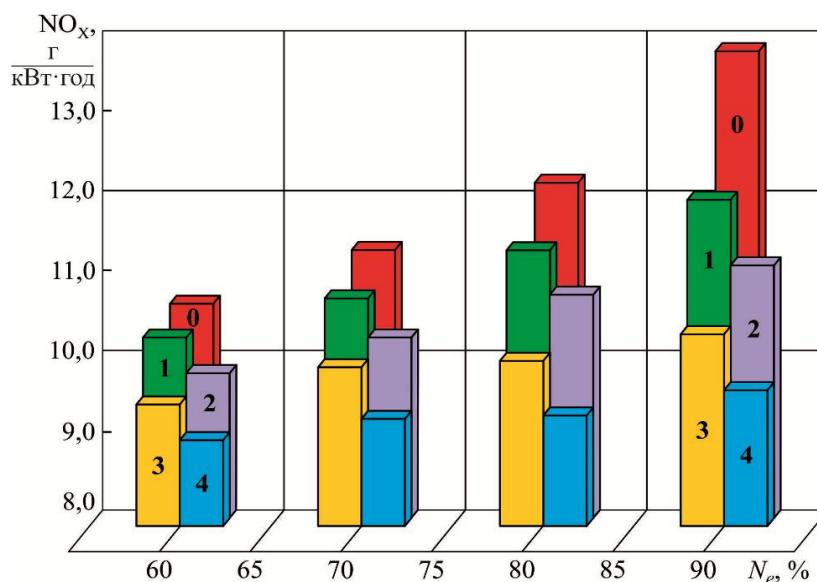


Рис. 2. Зміна концентрації оксидів азоту NO_x , г/(кВт · год), у випускних газах дизеля 7UEC60LS Mitsubishi для різного ступеня рециркуляції:
0 – робота без рециркуляції, $\text{EGR} = 0 \%$; 1 – $\text{EGR} = 5 \%$; 2 – $\text{EGR} = 10 \%$;
3 – $\text{EGR} = 15 \%$; 4 – $\text{EGR} = 20 \%$

Одним із негативних факторів, що пов'язані з використанням системи рециркуляції газів, є збільшення температури газів на виході з циліндрів. Це обумовлюється погіршенням якості процесу згоряння (через зменшення кисню в газоповітряній суміші) та збільшенням питомої витрати палива під час використання рециркуляції газів. Підтвердженням цього є діаграми, що наведені на рис. 4.

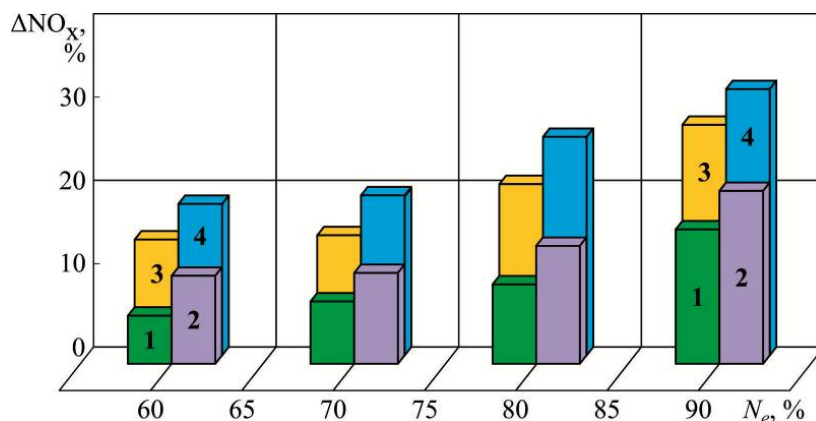


Рис. 3. Відносне зменшення емісії оксидів азоту NO_x з випускними газами дизеля 7UEC60LS Mitsubishi для різного ступеня рециркуляції:
1 – EGR = 5 %; 2 – EGR = 10 %; 3 – EGR = 15 %; 4 – EGR = 20 %

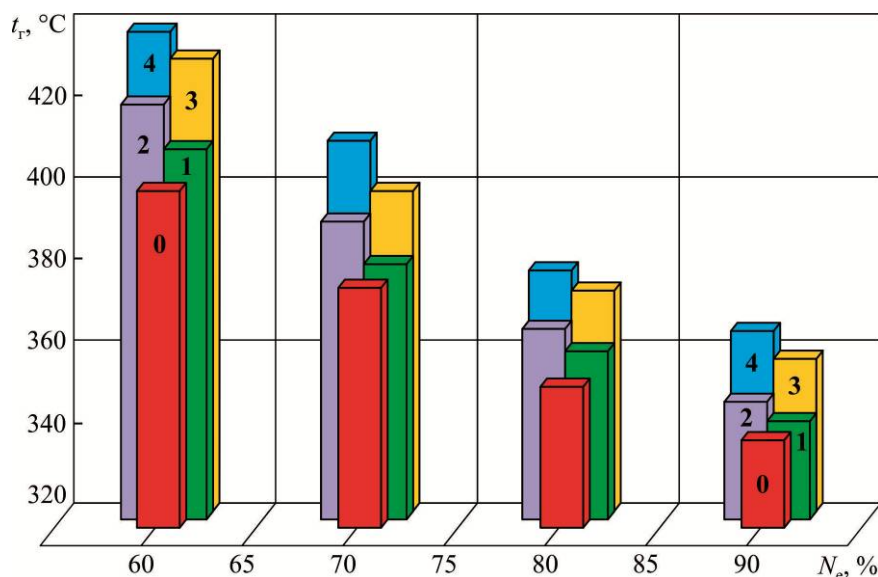


Рис. 4. Зміна температури випускних газів t_e , °C, дизеля 7UEC60LS Mitsubishi для різного ступеня рециркуляції, %:
0 – робота без рециркуляції, EGR = 0 %; 1 – EGR = 5 %; 2 – EGR = 10 %;
3 – EGR = 15 %; 4 – EGR = 20 %

Висновки. Одним із варіантів забезпечення екологічних параметрів роботи суднових дизелів (зокрема, емісії NO_x з випускними газами) є комплектація суднових дизелів системами рециркуляції випускних газів низького тиску LP-EGR, що забезпечують примусове повернення до циліндрів частини випускних газів із газовипускної системи.

Під час проведення експериментів на судовому малообертовому дизелі 7UEC60LS Mitsubishi встановлено, що зміна ступеня рециркуляції випускних газів у діапазоні 5...20 % забезпечує зниження концентрації оксидів азоту NO_x у випускних газах на 3,8...30,7 % залежно від навантаження дизеля, яке в експериментах змінювалося в інтервалі $N_c = (0,6...0,9)N_{\text{еном}}$. Причому найбільші значення зниження концентрації оксидів азоту NO_x у випускних газах відповідають інтервалу навантажень $(0,8...0,9)N_{\text{еном}}$, тобто найпоширенішим з експлуатаційних режимів роботи дизелів, що використовуються як головні.

Використання системи рециркуляції випускних газів високого тиску призводить до підвищення температури випускних газів, яке зумовлюється погіршенням якості процесу згоряння та збільшенням питомої витрати палива. У зв'язку із цим під час вибору експлуатаційних режимів роботи судового дизеля, що оснащений системою рециркуляції випускних газів, потрібно враховувати не лише екологічну ефективність, але й зміни температурних навантажень на циліндрову групу та газовипускну систему дизеля.

ЛІТЕРАТУРА

1. Varbanets R., Shumylo O., Marchenko A., Minchev D., Kyrnats V., Zalozh V., Aleksandrovska N., Brusnyk R., Volovyk K. Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines. *Polish maritime research*. 2022. № 29 (4). P. 88–96. <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
2. Petrychenko O., Levynskyi M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects. *Transport Systems and Technologies*. 2023. № 41. P. 96–106.
3. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines. *Technology Audit and Production Reserves*. 2023. № 5 (1(73)). P. 37–43. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.
4. Сагін С. В., Куропятник О. А. Використання системи рециркуляції випускних газів низького тиску для забезпечення екологічних показників суднових дизелів : матеріали VI міжнародної морської науково-практичної конференції кафедри СЕУ і ТЕ ОНМУ “Marine Power Plants & Operation MPP&O-2025”. 2025. <https://2025.depas.od.ua>.
5. Sagin S., Kuropyatnyk O., Matieiko O., Razinkin R., Stoliaryk T., Volkov O. Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12. 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.

6. Petrychenko O., Levynskyi M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport. *Sustainability*. 2025. Vol. 17. P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
7. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2021. No. 7–8. P. 36–43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
8. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2022. Вип. 45. С. 5–16. DOI: 10.31653/smf45.2022.5-16.
9. Varbanets R., Fomin O., Pištěk V., Klymenko V., Minchev D., Khrulev A., Zalozh V., Kučera P. Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9 (3). P. 321. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.
10. Kuropyatnyk O.A. Reduction of NO_x emission in the exhaust gases of low-speed marine diesel engines. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, Vienna-2018*. No. 7–8. P. 37–42. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-37-42.
11. Sagin A.S., Zablotskyi Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. 2021. No. 7–8. P. 14–17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
12. Побережний Р. В., Сагін С. В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 41. С. 5–9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
13. Neumann S., Varbanets R., Minchev D., Malchevsky V., Zalozh V. Vibrodiagnostics of marine diesel engines in IMES GmbH systems. *Ships and Offshore Structures*. 2022. No. 18 (11). P. 1535–1546. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2128558>.
14. Сагін С. В., Побережний Р. В. Аналіз основних способів зниження емісії оксидів азоту дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2022. Вип. 44. С. 132–141. DOI: 10.31653/smf44.2022.132-141.
15. Руснак Д. Ю., Сагін С. В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 40. С. 49–54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
16. Petrychenko O., Levynskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport. *Transport Systems and Technologies*. 2024. Vol. 43. P. 21–36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.

17. Зверьков Д. О., Сагін С. В. Зниження механічних втрат у судових дизелях. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 41. С. 20–25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.
18. Марченко О. О., Сагін С. В. Вдосконалення процесу очищення судових важких палив. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 41. С. 10–14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
19. Заблоцький Ю. В. Підвищення паливної економічності судових дизельних установок. *Вісник Одеського національного морського університету : зб. наук. праць.* 2020. № 2 (62). С. 106–119. DOI: 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.
20. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences.* 2021. No. 7–8. P. 36–43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
21. Сагін С. В., Сагін А. С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту. *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник.* 2023. Вип. 46. С. 118–131. DOI: 10.31653/smf46.2023.118-131.
22. Сагін С. В., Мадей В. В., Сагін А. С. Робота судового дизеля на біодизельному паливі. *Автоматизація судових технічних засобів : наук.-техн. зб.* 2021. Вип. 27. С. 93–107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.
23. Сагін С. В., Бондар С. А. Метод попередження аварійних ситуацій під час експлуатації судових дизелів за аналізом потоку відмов його основних вузлів. *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник.* 2023. Вип. 46. С. 101–109. DOI: 10.31653/smf46.2023.101-109.
24. Заблоцький Ю. В. Підвищення економічності роботи судових дизелів. *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 40. С. 12–16. DOI: 10.31653/smf340.2020.12-16.
25. Petrychenko O. Levinskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport. *Transport Systems and Technologies.* 2024. No. 43. P. 21–36.
26. Сагін С. С., Сагін С. В. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден. *Водний транспорт : зб. наук. праць.* 2024. Вип. 1 (39). С. 215–225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
27. Zablotskyi Yu.V., Sagin A.S. Applying of fuel additives in marine diesel engines. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2021. Вип. 43. С. 5–17. DOI: 10.31653/smf343.2021. 5-17.
28. Сагін С. В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури судових дизелів. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2018. Вип. 38. С. 132–142.
29. Сагін С. В., Суворов П. С., Бондар С. А. Розробка методу оцінки ризиків виникнення аварійних подій під час експлуатації дизелів

- морських суден. *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. 2023. Вип. 47. С. 122–130. DOI: 10.31653/smf47.2023.122-130.
30. Сагін С. В., Столярик Т. О. Динаміка суднових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками. *Автоматизація суднових технічних засобів : наук.-техн. зб.* 2021. Вип. 27. С. 108–119.
31. Сагін С. В., Мадей В. В., Сагін С. С., Чимшир В. І., Разінкін Р. О. Аналіз екологічної стійкості та енергетичної ефективності використання скрубберного очищення випускних газів дизелів суден морського транспорту. *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* 2023. Вип. 47. С. 157–171.

REFERENCES

1. Varbanets, R., Shumylo, O., Marchenko, A., Minchev, D., Kyrnats, V., Zalozh, V., Aleksandrovskaya, N., Brusnyk, R., Volovyk, K. (2022). Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines. *Polish maritime research*, 29 (4), 88–96. <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
2. Petrychenko, O., Levinskyi, M., Prytula, D., Vynohradova, A. (2023). Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects. *Transport Systems and Technologies*, 41, 96–106.
3. Sagin, S., Sagin, A. (2023). Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines. *Technology Audit and Production Reserves*, 5 (1(73)), 37–43. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.
4. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. (2025). Використання системи рециркуляції випускних газів низького тиску для забезпечення екологічних показників суднових дизелів. Materials of the International Conference “*Marine Power Plants & Operation MPP&O-2025*”. <https://2025.depas.od.ua>.
5. Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Matieiko, O., Razinkin, R., Stoliaryk, T., Volkov O. (2024). Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12, 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.
6. Petrychenko, O., Levinskyi, M., Goolak, S., Lukoševičius, V. (2025). Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport. *Sustainability*, 17, 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
7. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines. (2021). *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 7–8, 36–43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
8. Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Tkachenko, I. (2022). Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships. *Ship power plants*, 45, 5–16. DOI: 10.31653/smf45.2022.5-16.

9. Varbanets, R., Fomin, O., Píštěk, V., Klymenko, V., Minchev, D., Khrulev, A., Zalozh, V., Kučera, P. (2021). Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9 (3). 321. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.
10. Kuropyatnyk, O.A. (2018). Reduction of NO_x emission in the exhaust gases of low-speed marine diesel engines. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 7–8, 37–42.
11. Sagin, A.S., Zablotskyi, Yu.V. (2021). Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 7–8, 14–17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
12. Poberezhniy, R.V., Sagin, S.V. (2020). Zabezpechenya ekologichnykh pokaznikov dizeliv suden richkovogo ta morskogo transport. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 41, 5–9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
13. Neumann, S., Varbanets, R., Minchev, D., Malchevsky, V., Zalozh, V. (2022). Vibrodiagnostics of marine diesel engines in IMES GmbH systems. *Ships and Offshore Structures*, 18 (11), 1535–1546. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2128558>.
14. Sagin, S.V., Poberezhniy, R.V. (2022). Analiz osnovnich sposobiv znizhenya emisii oksidiv azotu dizeliv suden morskogo ta vnutrishnego vodnogo transportu. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 44, 132–141. DOI: 10.31653/smf44.2022.132-141.
15. Rusnak, D.Y., Sagin, S.V. (2020). Zabezpechenya ekologichnich vumog pri ultrazvukovii desulphurizacii vuglevodnich paliv. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 40, 49–54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
16. Petrychenko, O., Levinskyi, M. (2024). Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport. *Transport Systems and Technologies*, 43, 21–36. DOI: 10.32703/2617-9059-2024-43-2.
17. Zverkov, D.O., Sagin, S.V. (2020). Znizhenya mechanichnich vtrat u sudnovich dizelyach. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 41, 20–25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.
18. Marchenko, O.O., Sagin, S.V. (2020). Vdoskonalenyia procesu ochishenya sudnovih vazhkih paliv. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 41, 10–14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
19. Zablotskyi, Yu.V. (2020). Pidvishenya palivnoi ekonomichnosti sudnovih dizelnih ustanovok. *Visnik Odeskogo nacionalnogo morskogo universitetu*, 2, 106–119. DOI: 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.
20. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. (2021). Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 7–8, 36–43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
21. Sagin, S.V., Sagin, A.S. (2023). Control ta diagnostuvanya nadiinosti ta ekonomichnosti dizeliv morskikh ta richkovih

- zasobiv transportu. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 46, 118–131. DOI: 10.31653/smf46.2023.118-131.
22. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, A.S. (2021). Robota sudnovogo dizelya na biodizelnom palivi. *Avtomatizaciya sudnovih tehnicnih zasobiv*, 27, 93–107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.
23. Sagin, S.V., Bondar, S.A. (2023). Metod poperedzhenya avariinih situacii pid chas ekspluatatsii sudnovih dizeliv za analizom potocu vidmovo iogo osnovnih vuzliv. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 46, 101–109. DOI: 10.31653/smf46.2023.101-109.
24. Zablotskyi, Yu.V. (2020). Pidvishenya economichnosti roboti sudnovih dizeliv. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 40, 12–16. DOI: 10.31653/smf340.2020.12-16.
25. Petrychenko, O. Levinskyi, M. (2024). Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport. *Transport Systems and Technologies*, 43, 21–36.
26. Sagin, S.S., Sagin, S.V. (2024). Vicoristanya shtuchnogo intelektu v situaciyah nadmirmogo zblizhenya suden. *Vodnii transport*, 1 (39), 215–225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
27. Zablotskyi, Yu.V., Sagin, A.S. (2021). Applying of fuel additives in marine diesel engines. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 43, 5–17. DOI: 10.31653/smf343.2021. 5-17.
28. Sagin, S.V. (2018). Zнизhenya energetichnih vtrat v precizionih parah palivnoi aparaturi sudnovich dizeliv. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 38, 132–142.
29. Sagin, S.V., Suvorov, P.S., Bondar, S.A. (2023). Rozrobka metodu ocinki rizikiv vineknnya avariinih podii pid chas eksplyatatsii dizeliv morskih suden. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 47, 122–130. DOI: 10.31653/smf47.2023.122-130.
30. Sagin, S.V., Stolyaryk, T.O. (2021). Dinamika sudnovih dizeliv pid chas vikoristanya motornich mastil z rizmimi structurnimi harakteristikami. *Avtomatizaciya sudnovih tehnicnih zasobiv*, 27, 108–119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
31. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, S.S., Chimshir, V.I., Razinkin, R.O. (2023). Analiz ecologichnoi stiičnosti ta energetichnoi efectivnosti vicoristanya scrubernogo ochishenya vipusknych gaziv dizeliv sudden morskogo transportu. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 47, 157–171.

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 29.08.2025

Дата публікації: 30.10.2025

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656.6:616-036

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2025.3-26.07>

ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ ФЛОТУ ТА ЙОГО РОЗПОДІЛ ЗА ЛІНІЯМИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ КОНТЕЙНЕРОПОТОКІВ

С.П. Онищенко¹, О.М. Мельник², О.Л. Дрожжин³, Ю.А. Бондаренко⁴

¹ д-р екон. наук, професор,
професор кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-7528-4939

² д-р техн. наук, професор, професор кафедри «Судноводіння та морська безпека»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-9228-8459

³ канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-9695-9296

⁴ Phd, Чорноморська кріюінгова компанія ОСКАР,
ORCID ID: 0000-0001-8393-1481

Анотація

Вступ. Планування складу флоту, який відповідає цілям та конкурентоспроможності компанії-перевізника, а також сучасним тенденціям ринку контейнерних перевезень, базується на вивченні контейнеропотоків з урахуванням їх невизначеності. Це формує інформаційне підґрунтя для прийняття рішень щодо структури флоту та його роботи. Ці рішення також передбачають розгляд доцільності функціонування лінійних сервісів загалом і закріплення за ними суден зокрема. **Результати.** У рамках цього дослідження запропоновано математичну модель для стратегічного рівня управління, де період часу, що розглядається, становить рік та більше. У складі флоту – власні та пропоновані для тайм-чартерної оренди судна, тому змінні моделі відображають відповідні умови – яке судно чи які судна працюють на певній лінії, судна як власні, так й орендовані. Цільова функція моделі – загальний прибуток від експлуатації суден, який враховує, крім прибутку від роботи власних та орендованих суден на лініях, також прибуток від власних суден, які пропонується віддати у тайм-чартерну оренду з урахуванням економічної доцільності. Обмеження моделі враховують: забезпечення обсягу перевезень у діапазоні від песимістичного до оптимістичного рівня між портами лінії; припустиму кількість орендованих у тайм-чартер суден; забезпечення певного рівня ефективності роботи кожного судна на лініях. Результати оптимізації надають склад флоту та розподіл суден за лініями, що розглядаються. **Висновки.** Запропонована математична модель оптимізації

складу флоту та його розподілу за лініями є достовірною з урахуванням відповідності результатів вхідним даним та адекватної реакції результатів на зміни вхідних даних. Ця модель, як розвиток існуючих моделей, не суперечить результатам попередніх досліджень, які створили відповідну теоретичну базу для вказаного розвитку, що також підтверджує її достовірність. Результати оптимізації утворюють базу для прийняття рішень, даючи змогу експериментувати «що, якщо» з рівнем фрахтових ставок, оперативних витрат суден, обсягів роботи, вартістю тайм-чартерної оренди тощо.

Ключові слова: контейнерні перевезення, морські перевезення, попит, обсяги перевезень, ефективність, оптимізація, невизначеність, моделювання, контейнеромісткість, лінійний сектор судноплавства, провізна здатність

FLEET OPTIMIZATION AND ITS DISTRIBUTION ON THE LINES UNDER CONTAINER FLOWS UNCERTAINTY

S.P. Onyshchenko¹, O.M. Melnyk², O.L. Drozhzhyn³, Y.A. Bondarenko⁴

¹ Doctor of Economics, professor,
Professor of the Department “Fleet Operations and Shipping Technology”,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-7528-4939

² Doctor of Tech.Sc., professor,
professor of the Department “Navigation and Maritime Safety”,
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-9228-8459

³ Ph.D. Assoc.Prof.,
Associate Professor of the Department “Fleet Operation and Shipping Technology”,
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-9695-9296

⁴ Phd, Black Sea Crewing Company OSCAR
ORCID ID: 0000-0001-8393-1481

Summary

Introduction. Planning the fleet composition, which corresponds to the goals and competitiveness of the carrier company, as well as modern trends in the container transportation market, is based on the study of container flows, taking into account their uncertainty. This forms the information basis for making decisions regarding the structure of the fleet and its operation. These decisions also involve considering the feasibility of operating liner services in general and assigning vessels to them, in particular. **Results.** A mathematical model for the strategic management level is proposed, where the period of time under consideration is a year or more. The fleet includes both own and time-charter vessels, so the model variables reflect the relevant conditions – which vessel or vessels operate on a certain line, both own and leased vessels. The target function of the model is the total profit from the operation of vessels, which takes into account, in addition to the profit from the operation of own and leased vessels on the lines, also the profit from own vessels that are proposed to be leased on time-charter; taking into account economic feasibility. The model limitations take into account: ensuring the volume of transportation in the range from pessimistic to optimistic levels between the ports of the lines; the permissible number of vessels leased on time-charter; ensuring a

*certain level of efficiency of each vessel on the lines. The optimization results provide the fleet composition and distribution of vessels on the lines. **Conclusions.** The proposed mathematical model for optimizing the fleet composition and its distribution on the lines is reliable, taking into account the compliance of the results with the input data and the adequate response of the results to changes in the input data. This model, as a development of existing models, does not contradict the results of previous studies that created an appropriate theoretical basis for the specified development, which also confirms its reliability. The optimization results form a basis for decision-making, allowing for “what-if” experiments with the level of freight rates, operational costs of vessels, work volumes, the cost of time charter, etc.*

Key words: *container transportation, maritime transportation, demand, transportation volumes, efficiency, optimization, uncertainty, modelling, container capacity, linear shipping sector, carrying capacity.*

Вступ. Індустрія сучасного судноплавства стикається зі складним середовищем, що характеризується нерівномірною та незбалансованою потужністю в різних сегментах. Геополітичні фактори, зміни маршрутів руху суден, старіння флоту, відносно помірний портфель замовлень на судна, суднобудівні обмеження [1], основна надлишкова місткість контейнеровозів і реструктуризація на ринку лінійних перевезень є факторами, які визначають перспективи судноплавної галузі загалом і контейнерного сектору зокрема. Крім того, сучасні вимоги щодо безпеки судноплавства та його екологічності [2; 3] обґрунтовують перегляд стратегій розвитку судноплавних компаній.

Планування складу флоту, який відповідає цілям і конкурентоспроможності компанії-перевізника, а також сучасним тенденціям ринку контейнерних перевезень, базується на вивченні контейнеропотоків з урахуванням їх невизначеності [4; 5]. Це формує інформаційне підґрунтя для прийняття рішень щодо структури флоту та його роботи. Ці рішення також передбачають розгляд доцільності функціонування лінійних сервісів загалом і закріплення за ними суден зокрема.

Постановка проблеми. Під складом флоту розуміється насамперед множина суден із певними характеристиками – у цьому випадку контейнеромісткостей. Ця множина складається з власних та орендованих суден, що також формує відповідну структуру. Слід зазначити, що навіть у компаній-«гігантів» сектору контейнерних перевезень (Maersk, MSC тощо) значну частку в структурі флоту займають орендовані судна, що надає можливість гнучкого управління флотом з погляду контейнеромісткості та його розподілу: зі зменшенням попиту на окремих напрямках доцільним є заміна суден значної контейнеромісткості на меншу, що зручніше й ефективніше робити, оперуючи орендованими суднами. Тому частка орендованих суден у структурі флоту компаній, з одного боку, надає можливість гнучкого його розподілу, з іншого – зменшує як комерційні, так й інвестиційні ризики. В умовах зростання попиту тайм-чартерна оренда забезпечує швидке поповнення флоту [6] та надає можливість розширення присутності на ринку в умовах, коли будівництво нових суден потребує часу та займає до декількох років.

Отже, центральне місце в управлінні роботою флотом належить розподілу суден за ринками, лініями, схемами, системами доставки, довгостроковими контрактами [6–10]. Задачі розподілу суден за напрямками перевезень (схемами перевезень) є класичними для судноплавства й розглядалися ще за радянських часів у вітчизняних дослідженнях у різних постановках – за умов освоєння вантажопотоків або ні. Переважно задачі того періоду не передбачали оренду суден, а тільки придбання, що в умовах планової економіки розглядалась як окрема задача, а в «розподільних» задачах (таку назву вони отримали у спеціальній літературі) здійснювався лише їх розподіл за схемами роботи.

Сучасні дослідження вже орієнтуються на можливість оренди суден і врахування цього в рамках оптимізаційних моделей (наприклад, [6]). Як предмет розподілу розглядалися: напрями роботи [7], системи доставки вантажів [2], довгострокові фрахтові контракти [9]. Що стосується невизначеності, то вона також враховувалась у деяких роботах. Наприклад, у [9] довгострокові контракти характеризувалися нечіткими множинами, що призводило до розгляду інтервальних значень окремих показників в оптимізаційній моделі, але ж знаходження рішення за допомогою цієї моделі потребує використання спеціальних алгоритмів і створення відповідного програмного забезпечення. У [6] щодо розподілу суден за системами доставки вантажів акцентувалась увага на невизначеності фрахтових ставок, тому в цільовій функції оптимізаційної моделі враховані ризики можливих втрат судновласника з урахуванням підвищення рівня фрахтових ставок порівняно із запланованим.

У зарубіжних джерелах значна увага приділяється формуванню та оптимізації маршрутів (наприклад, [11–13]), розкладу роботи суден [14; 15] та розподілу порожніх контейнерів [16; 17]. Але ж у більшості джерел під маршрутом розуміється фізичний шлях руху судна з урахуванням географічних особливостей регіону. У [11] розглядалася задача розподілу суден-контейнеровозів за лініями, проте модель, яка запропонована, не враховує невизначеності контейнеропотоків, а також можливості «гнучкого» управління флотом з погляду зміни його структури за допомогою тайм-чартерної оренди.

Слід констатувати, що, незважаючи на значну увагу, приділену питанням контейнерних перевезень, сучасні дослідження оптимізації розподілу суден орієнтовані переважно на балкерні судна, тому не враховують особливостей контейнерних перевезень, невизначеності контейнеропотоків та, як наслідок, обсягів перевезень; отже, задача оптимізації складу флоту та його розподілу між лініями потребує певного вивчення з урахуванням вищезгаданих зауважень.

Мета статті. З огляду на вищезазначене метою цього дослідження є забезпечення ефективності роботи суден-контейнеровозів на базі оптимізаційної моделі формування складу флоту та його розподілу за лініями з урахуванням невизначеності контейнеропотоків. Досягнення мети передбачає розробку й експериментальну перевірку моделі, яка враховує особливості роботи суден-контейнеровозів на лініях і результати попередніх досліджень, пов'язаних з аналогічними задачами для інших секторів судноплавства.

Результати. З урахуванням результатів [6; 8] у цьому дослідженні розглядається математична модель задачі оптимізації складу флоту та його розподілу по лініях з урахуванням невизначеності обсягів перевезень.

Введемо позначення:

$n = \overline{1, N}$ – маршрути лінійних сервісів;

$s = \overline{1, S}$ – судна компанії, що розглядаються, ці судна вважаємо власністю компанії;

$s' = \overline{1, S'}$ – судна, які розглядаються як претенденти на поповнення флоту шляхом тайм-чартерної оренди;

$X_{sn} = \{0, 1\}, s = \overline{1, S}, n = \overline{1, N}$ – змінні моделі, які приймають значення 1, якщо судно s працюватиме на маршруті лінії n , 0 – у протилежному випадку;

$Y_s = \{0, 1\}, s = \overline{1, S}$ – змінні моделі, які приймають значення 1, якщо це судно s слід віддати в тайм-чартерну оренду;

$Y_{s'} = \{0, 1\}, s' = \overline{1, S'}$ – змінні моделі, які приймають значення 1, якщо це судно s' слід взяти в тайм-чартерну оренду;

$X_{s'n} = \{0, 1\}, s' = \overline{1, S'}, n = \overline{1, N}$ – змінні моделі, які приймають значення 1, якщо судно s' працюватиме на маршруті лінії n , 0 – у протилежному випадку.

Враховуючи специфіку завдання, введемо до розгляду такі показники, що характеризують роботу суден на лініях, передусім провізну здатність суден $P_n^s, P_n^{s'}, n = \overline{1, N}, s' = \overline{1, S'}, s = \overline{1, S}$ (тис. TEU), при цьому розглядаються не всі судна, а тільки їх частина, тобто для розрахунків цього показника приймаються судна $s \in \Omega_s^n, s' \in \Omega_{s'}^n$, де Ω_s^n та $\Omega_{s'}^n$ – множини суден, які є доцільними для використання на лінії $n = \overline{1, N}$. Ця доцільність встановлюється на етапі первинного аналізу флоту та ліній з урахуванням результатів їх роботи в попередній період часу, а також з урахуванням прогнозів. Також слід зазначити, що в класичному варіанті розрахунку провізної здатності враховуються завантаження судна, час рейсу й експлуатаційний період.

Зазвичай максимізація прибутку є основним критерієм [6; 9; 10] для формування складу флоту, якщо інше не передбачено стратегіями розвитку компанії – наприклад, якщо компанія намагається сформувати нову клієнтську базу та здійснити закріплення на певному географічному сегменті в новому напрямку перевезень в умовах, коли попит має перспективу зростання, але на цьому етапі його рівень не дає змоги отримувати необхідний рівень прибутку. Проте згадана ситуація є окремим випадком, тому вважаємо, що максимізація прибутку є критерієм під час вирішення завдання, що розглядається, – визначення складу флоту та його розподілу з урахуванням невизначеності обсягів перевезень.

Отже, для суден, що є власністю компанії, прибуток F_s від роботи на лініях формується таким чином:

$$F_s = \sum_{n=1}^N F_{sn} - R_s^{fix}, s = \overline{1, S}, \quad (1)$$

$$F_{sn} = k_n \cdot P_n^s \cdot f_n - R_{sn}^{3M}, s = \overline{1, S}, n = \overline{1, N}, \quad (2)$$

де F_{sn} – економічний результат роботи судна на певній лінії без врахування постійних витрат; R_s^{fix} – постійні витрати судна $s = \overline{1, S}$ за рік; R_{sn}^{3M} – змінні витрати судна $s = \overline{1, S}$ за рік на лінії $n = \overline{1, N}$; P_n^s – провізна здатність судна

$s = \overline{1, S}$ за рік на лінії $n = \overline{1, N}$; f_n – усереднене значення фрахтової ставки (дол./TEU) на лінії $n = \overline{1, N}$; k_n – коефіцієнт, який враховує середній рівень використання контейнеромісткості, прийнятий для визначення очікуваного середнього значення результату роботи судна.

Слід зауважити, що змінні витрати R_{sn}^{3M} враховують портові збори, паливо, вартості проходження каналів і протоків, що визначається специфікою лінії (складу портів та маршруту); постійні витрати R_s^{fix} (страхування, планові ремонти, менеджмент тощо) не залежать від лінії, а визначаються суто характеристиками судна. F_{sn} не є прибутком, тому що не враховує постійних витрат, у деяких зарубіжних джерелах цей показник визначається як «заробіток суден».

Аналогічні показники визначаються для орендованих суден:

$$F_{s'} = \sum_{s'=1}^{S'} F_{s'n} - R_{s'}^{ich}, s' = \overline{1, S'}, \quad (3)$$

$$F_{s'n} = k_n \cdot P_n^{s'} \cdot f_n - R_{s'n}^{3M}, s' = \overline{1, S'}, n = \overline{1, N}, \quad (4)$$

де $F_{s'n}$ – економічний результат роботи судна на певній лінії без врахування постійних витрат; $R_{s'n}^{3M}$ – змінні витрати судна $s' = \overline{1, S'}$ за рік на лінії $n = \overline{1, N}$; $R_{s'}^{ich}$ – річні витрати (тис. дол.) відповідно до умов тайм-чартерної оренди згідно ставки оренди $f_{s'}^{ich}$ (дол./добу):

$$R_{s'}^{ich} = f_{s'}^{ich} \cdot T_{s'}^{ich}, \quad (5)$$

де $T_{s'}^{ich}$ – період тайм-чартеру, приймається як річний.

У судноплавстві F_s , F_{sn} , R_{sn}^{3M} , R_s^{fix} , $F_{s'}$, $F_{s'n}$, $R_{s'n}^{3M}$ вимірюються в тис. дол. / тис. євро з урахуванням специфіки прийнятої системи розрахунків.

Слід зазначити, що можливі дві ситуації із суднами компанії: (1) усі вони використовуватимуться на маршрутах або (2) тільки їх частина, виходячи з умов доцільності. Для другої ситуації судна, які недоцільно використовувати, потрібно віддати в тайм-чартерну оренду, що забезпечить компанії додатковий прибуток F'_s (тис. дол.) з урахуванням доходу від тайм-чартерної оренди:

$$F'_s = f_s^{ich} \cdot T - R_s^{fix}, s = \overline{1, S}, \quad (6)$$

де T – період часу, що розглядається (приймаємо як рік з урахуванням попередніх міркувань). Цей прибуток враховується для суден, яким відповідають значення змінних $Y_s = 1$. Слід зазначити, що змінні $Y_s, s = \overline{1, S}$ та $Y_{s'}, s' = \overline{1, S'}$ є допоміжними змінними, які введено в модель для більш зручної практичної реалізації, що обґрунтовується виконанням відповідних експериментальних досліджень, результати їх наведено нижче.

Отже, загальний прибуток компанії від роботи суден складається з трьох складових:

- прибутку F_s від роботи власних суден на лініях згідно з (1)–(2), що в рамках моделі відповідає множині змінних, для яких виконується $\sum_{n=1}^N X_{sn} = 1$ та $Y_s = 0$:

$$\sum_{s=1}^S F_s = \sum_{s=1}^S \left(\sum_{n=1}^N F_{sn} \cdot X_{sn} \right) - R_s^{fix}; \quad (7)$$

• прибутку F_s , від роботи орендованих суден на лініях згідно з (3) – (5), що в рамках моделі відповідає множині змінних, які приймають значення $Y_s = 1$:

$$\sum_{s'=1}^{S'} F_{s'} = \sum_{s'=1}^{S'} \left(\sum_{n=1}^N F_{s'n} \cdot X_{s'n} \right) - R_{s'}^{tch} \cdot Y_{s'}; \quad (8)$$

• прибутку від тайм-чартерної оренди суден F'_s згідно з (6), що в рамках моделі відповідає змінним, для яких виконується $\sum_{n=1}^N X_{sn} = 0$ та відповідно $Y_s = 1$:

$$\sum_{s=1}^S F'_s \cdot Y_s. \quad (9)$$

Отже, цільова функція моделі – максимізація прибутку від роботи суден компанії на лініях з урахуванням як власних суден, так і суден, які орендовано, а також суден у тайм-чартері:

$$\begin{aligned} & \sum_{s=1}^S \left(\sum_{n=1}^N F_{sn} \cdot X_{sn} - R_s^{fix} \right) + \sum_{s'=1}^{S'} \left(\sum_{n=1}^N F_{s'n} \cdot X_{s'n} - R_{s'}^{tch} \cdot Y_{s'} \right) + \\ & + \sum_{s=1}^S F'_s \cdot Y_s \rightarrow \max \end{aligned} \quad (10)$$

Слід зазначити, що постійні витрати для власних суден R_s^{fix} не залежать від того, як працює судно (мається на увазі, працює на лінії чи в тайм-чартері), у разі тайм-чартерної оренди судновласник також покриває ці витрати, тому в (7) та (10) R_s^{fix} не пов'язано зі змінними моделі.

Зауважимо, що цільова функція не враховує наведеного вище розподілу суден на множини Ω_s^n та $\Omega_{s'}^n$ – множини суден, які є доцільними для використання на лінії $n = \overline{1, N}$, тому що в цільовій функції враховуються всі судна та всі лінії. Ці множини мають значення для обмежень, які враховують обсяги перевезень, та будуть розглянуті нижче.

Оскільки для власних суден компанії обов'язковим є вибір однієї з форм експлуатації (робота на лініях або робота в тайм-чартері), перша група обмежень враховує цей факт:

$$\left(\sum_{n=1}^N X_{sn} \right) + Y_s = 1, s = \overline{1, S}, \quad (11)$$

отже, або судно працює на лінії – тоді одна змінна з множини X_{sn} для певного судна $s = \overline{1, S}$ дорівнює одиниці, або судно здається у тайм-чартер – усі відповідні X_{sn} дорівнюють 0, тоді Y_s дорівнює 1.

Аналогічна умова, але з урахуванням факту оренди судна, має місце для відповідної категорії суден:

$$\left(\sum_{n=1}^N X_{s'n} \right) = Y_{s'}, s' = \overline{1, S'}, \quad (12)$$

якщо судно $s' = \overline{1, S'}$ слід орендувати, тоді відповідне значення $Y_{s'}$ дорівнює одиниці, отже, одна зі змінних $X_{s'n}$ має також дорівнювати 1 – судно має працювати за однією з множини ліній. Якщо судно не вибрано для оренди, то значення 0 для відповідних змінних забезпечать також виконання цієї умови, отже, усі відповідні значення $X_{s'n}$ дорівнюватимуть 0.

Традиційним набором обмежень для розподільних задач є [6]:

- обмеження за обсягами перевезень за період, що розглядається;
- обмеження за можливостями оренди суден у тайм-чартер (бажання керівництва компанії);
- забезпечення певного рівня прибутку – мінімальний рівень для припустимого прибутку – як загалом, так і для кожного судна окремо.

Обмеження за кількістю орендованих суден:

$$\sum_{s'=1}^{S'} Y_{s'} \leq W, \quad (13)$$

де W – максимально припустима кількість орендованих суден, це обмеження встановлюється керівництвом компанії.

Слід зауважити, що для власних суден компанії аналогічне обмеження відсутнє, тому що (11) забезпечують охоплення всього флоту компанії (власні судна). Але в разі потреби можливе введення аналогічного обмеження, яке враховує, яка максимальна кількість власних суден є допустимою для задачі в оренду:

$$\sum_{s=1}^S Y_s \leq W^*, \quad (14)$$

До того ж можна врахувати умову «заборони» на здачу власних суден в оренду, трансформуючи відповідним чином (11) та (10):

$$\sum_{n=1}^N X_{sn} = 1, s = \overline{1, S}, \quad (15)$$

$$\sum_{s=1}^S \left(\sum_{n=1}^N F_{sn} \cdot X_{sn} - R_s^{fix} \right) + \sum_{s'=1}^{S'} \left(\sum_{n=1}^N F_{s'n} \cdot X_{s'n} - R_{s'}^{tch} \cdot Y_{s'} \right) \rightarrow \max. \quad (16)$$

У такому випадку $Y_s, s = \overline{1, S}$ не розглядаються.

З урахуванням невизначеності контейнеропотоків обмеження за обсягами перевезень мають такий вигляд:

$$Q''_n \leq \sum_{s \in \Omega_S^s} P_n^s \cdot X_{sn} + \sum_{s' \in \Omega_S^{s'}} P_n^{s'} \cdot X_{s'n} \leq Q'_n, n = \overline{1, N}, \quad (17)$$

де $Q''_n, Q'_n, n = \overline{1, N}$ – відповідно оптимістичний і песимістичний варіант обсягів перевезень (тис. TEU) на лінії [5]; $\sum_{s \in \Omega_S^s} P_n^s \cdot X_{sn}$ – загальна провізна здатність

власних суден компанії на лінії n (тис. TEU); $\sum_{s' \in \Omega_s^n} P_n^{s'} \cdot X_{s'n}$ – загальна провізна здатність орендованих у тайм-чартер суден на лінії n (тис. TEU); $s \in \Omega_S^n$, $s' \in \Omega_{S'}^n$, де Ω_S^n та $\Omega_{S'}^n$ – множини суден, які є доцільними для використання на лінії $n = \overline{1, N}$.

Слід зауважити, що показники провізної здатності й обсяги перевезень орієнтовані на загальний період, що розглядається. На практиці, звісно, контейнеропотоки нерівномірно розподіляються в часі, тому навіть за позитивного прогнозу контейнеропотоків в окремі періоди попит на перевезення буде вищий, ніж в інші; при цьому можлива ситуація, коли контейнеромісткість судна не дає змоги прийняти цю кількість контейнерів, але спрогнозувати це достатньо складно. Крім того, урахування оптимістичного та песимістичного варіантів надає деякий діапазон, який частково враховує такі ситуації.

Також специфікою лінійного судноплавства є те, що зазвичай судна не працюють одразу на декількох лініях, отже, кожне судно пов'язане з певною лінією. Слід зазначити, що в багатьох «класичних» розподільних моделях це не було передбачено, а як змінні використовувалися частки експлуатаційного періоду, що враховувало можливість роботи одного судна на кількох лініях (схемах).

Для комплектування моделі останній етап – формування обмежень на значення змінних моделі:

$$X_{sn} = \{0, 1\}, s = \overline{1, S}, n = \overline{1, N}, \quad (18)$$

$$X_{s'n} = \{0, 1\}, s' = \overline{1, S'}, n = \overline{1, N}, \quad (19)$$

$$Y_s = \{0, 1\}, s = \overline{1, S}, \quad (20)$$

$$Y_{s'} = \{0, 1\}, s' = \overline{1, S'}, \quad (21)$$

Таким чином, вирази (10)–(14), (17)–(21) формують математичну модель, яка встановлює оптимальний склад флоту та здійснює одночасно його розподіл між лініями з урахуванням невизначеності обсягів перевезень на лініях. Цю невизначеність враховано насамперед у відповідних обмеженнях (17), а також під час визначення економічних результатів роботи суден у цільовій функції за допомогою введення коефіцієнтів k_n , які враховують середній рівень використання контейнеромісткості, прийнятий для визначення очікуваного середнього значення результату роботи судна.

Виконано експериментальну перевірку запропонованої математичної моделі за різними варіантами даних, результати підтвердили її достовірність та можливість практичного застосування.

Підводячи підсумок, зазначимо:

1) запропонована математична модель оптимізації складу флоту та його розподілу за лініями є достовірною з урахуванням відповідності результатів вхідним даним та адекватної реакції результатів на зміни вхідних даних;

2) ця модель як розвиток існуючих моделей не суперечить результатам попередніх досліджень, які створили відповідну теоретичну базу для вказаного розвитку, що також підтверджує її достовірність;

3) результати оптимізації утворюють базу для прийняття рішень, даючи змогу експериментувати «що, якщо» з рівнем фрахтових ставок, оперативних витрат суден, обсягів роботи, вартістю тайм-чартерної оренди тощо.

Висновки. У рамках цього дослідження запропоновано математичну модель для стратегічного рівня управління, де період часу, що розглядається, становить рік та більше. У складі флоту – власні та пропонувані для тайм-чартерної оренди судна, тому змінні моделі відображають відповідні умови – яке судно чи які судна працюють на певній лінії, судна як власні, так й орендовані. Цільова функція моделі – загальний прибуток від експлуатації суден, який враховує, крім прибутку від роботи власних та орендованих суден на лініях, також прибуток від власних суден, які пропонується віддати в тайм-чартерну оренду з урахуванням економічної доцільності. Обмеження моделі враховують: забезпечення обсягу перевезень у діапазоні від песимістичного до оптимістичного рівня між портами ліній; припустиму кількість орендованих у тайм-чартер суден; забезпечення певного рівня ефективності роботи кожного судна на лініях. Результати оптимізації надають склад флоту та розподіл суден за лініями, що розглядаються.

Слід відмітити, що ця модель є розвитком існуючих математичних моделей «розподільних задач», які в сучасних постановках сформульовано для балкерних суден та які не враховують специфіки контейнерного сектору судноплавства, у тому числі особливостей формування експлуатаційних та економічних показників. Тому розвиток існуючих досліджень полягає у тому, що вказана специфіка й особливості роботи суден-контейнеровозів на лініях враховані в цій моделі, що поширює межі використання існуючих результатів (моделей) на лінійний сектор судноплавства.

ЛІТЕРАТУРА

1. Берестенко В., Онищенко С. Структура та характеристики мультимодальної доставки з позиції цифровізації. *Розвиток транспорту*. 2021. № 4 (11). С. 82–93. DOI: 10.33082/td.2021.4-11.08.
2. Onyshchenko S., Savelieva I., Melnyk O., Koryakin K., Kotenko O. Enhancing Safety and Efficiency in Maritime Ergatic Systems Through Advanced Information Technologies. *Systems, Decision and Control in Energy VII: Volume I: Energy Informatics and Transport*. 2021. P. 295–308.
3. Onishchenko O., Golikov V., Melnyk O., Onyshchenko S., Obertiur K. Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022. Vol. 116. P. 223–235. DOI: 10.20858/sjsutst.2022.116.14.
4. Решетков Д. М., Онищенко С. П., Павлова Н. Л., Кириллова В. Ю. Сутність, переваги та проблеми автоматизації контейнерних терміналів морських портів. *Вчені записки Таврійського*

- національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2023. Том 34 (73). № 2. С. 194–202. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.2.2/33.
5. Бондаренко Ю. А., Онищенко С. П. Структура та невизначеність контейнеропотоків у системі морських перевезень. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Том 35 (74). № 1. С. 139–146. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.1.2/23.
 6. Koskina, Y., Onyshenko, S., Drozhzhyn, O., Melnyk, O. Efficiency of tramp fleet operating under the contracts of affreightment. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2023. Vol. 120. P. 137–149. ISSN: 0209-3324. DOI: 10.20858/sjsutst.2023.120.9.
 7. Вишневський Д. О. Методичні основи організації роботи універсальних суден на міжнародних лініях : дис. канд. : 05.22.01. Одеса, 2016. 171 с.
 8. Drozhzhyn O., Koskina Y. The model of container feeder line organization focused on the nature and parameters of external container flows. *Komunikácie*. 2021. Vol. 23 (2). DOI: 10.26552/com.C.2021.2.A94-A102.
 9. Vyshnevskyi D., Vyshnevskya O., Onyshchenko S. Modeling of the distribution of the vessels' time budget under long-term freight contracts within conditions of uncertainty. *Development of Management and Entrepreneurship Methods on Transport*. 2019. Vol. 69 (4). P. 15–25. DOI: 10.31375/2226-1915-2019-4-15-25.
 10. Кириллова О. В. До питання обґрунтування розподілу контейнеропотоків між суднами, обслуговуючими магістрально-фідерної лінії. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2014. № 2 (11). С. 55–68.
 11. Christiansen M., Fagerholt K., Nygreen B., Ronen, D. Ship routing and scheduling in the new millennium. *European Journal of Operational Research*. 2013. Vol. 228 (3). P. 467–483.
 12. La Scalia G., S. Mancini, L. Adelfio, A. Giallanza. Development of a Vessel Scheduling Optimization Model to improve Maritime Transport sustainability. *Sustainable Futures*. 2023. Vol. 6. 100123. DOI: 10.1016/j.sftr.2023.100123.
 13. Meng Q., Wang S., Andersson H., Thun K. Containership Routing and Scheduling in Liner Shipping: Overview and Future Research Directions. *Transportation Science*. 2014. Vol. 48. P. 265–280. DOI: 10.1287/trsc.2013.046 1.
 14. Henry S.M., Hoffman M.J., Waddell L.A., Muldoon F.M. Holistic fleet optimization incorporating system design considerations. *Naval Research Logistics (NRL)*. 2023. Vol. 70 (7). P. 675–690.
 15. Ksciuk J., Kuhlemann S., Tierney K., Koberstein A. Uncertainty in maritime ship routing and scheduling: A Literature review. *European*

- Journal of Operational Research*. 2023. Vol. 308. Issue 2. P. 499–524. DOI: 10.1016/j.ejor.2022.08.006.
16. Legros B., Bouchery Y., Fransoo J. A. Time-Based Policy for Empty Container Management by Consignees. *Production and Operations Management*. 2019. Vol. 28. P. 1503–1527. DOI: 10.1111/poms.12996.
17. Chien-Chang Chou, Rong-Hua Gou, Chaur-Luh Tsai, Ming-Cheng Tsou, Chun-Pong Wong, Hui-Lin, Yu. Application of a mixed fuzzy decision making and optimization programming model to the empty container allocation. *Applied Soft Computing*. 2010. Vol. 10, Issue 4. P. 1071–1079. DOI: 10.1016/j.asoc.2010.05.008.

REFERENCES

1. Berestenko, V., Onyshchenko, S. (2021). Structure and characteristics of multimodal delivery from the digitalization point of view [Struktura ta kharakterystyky multimodalnoyi dostavky z pozytsiyi tsyfrovizatsiyi]. *Transport development*, 4 (11), 82–93. DOI: 10.33082/td.2021.4-11.0810 [in Ukrainian].
2. Onyshchenko, S., Savelieva, I., Melnyk, O., Koryakin, K., Kotenko, O. (2021). Enhancing Safety and Efficiency in Maritime Ergatic Systems Through Advanced Information Technologies. *Systems, Decision and Control in Energy VII: Volume I: Energy Informatics and Transport*. P. 295–308.
3. Onishchenko, O., Golikov, V., Melnyk, O., Onyshchenko, S., Obertiur, K. (2022). Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 116, 223–235. DOI: 10.20858/sjsutst.2022.116.14.
4. Reshetkov, D.M., Onyshchenko, S.P., Pavlova, N.L., Kirillova, V.Yu. (2023). The essence, advantages and problems of automation of container terminals of seaports [Sutnist, perevahy ta problemy avtomatyzatsiyi konteynernykh terminaliv morskyykh portiv]. *Scientific notes of the Tavria National University named after V.I. Vernadsky. Series: Technical Sciences*, 34 (73), 2, 194–202. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.2.2/33 [in Ukrainian].
5. Bondarenko, Yu.A., Onyshchenko, S.P. (2024). Structure and uncertainty of container flows in the maritime transport system [Struktura ta nevyznachenist konteyneropotokiv u systemi morskyykh perevezen]. *Academic notes of the Tavri National University V.I. Vernadskyi. Series: Technical Sciences*, 35 (74), 1, 139–146 [in Ukrainian].
6. Koskina, Y., Onyshenko, S., Drozhzhyn, O., Melnyk, O. (2023). Efficiency of tramp fleet operating under the contracts of affreightment. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 120, 137–149. ISSN: 0209-3324. DOI: 10.20858/sjsutst.2023.120.9.
7. Vyshnevsky, D.O. (2016). Methodical bases of the organization of work of universal vessels on international lines [Metodychni osnovy

- orhanizatsiyi roboty universal'nykh suden na mizhnarodnykh liniyakh]. *Candidate's thesis*. Odesa. 171 p. [in Ukrainian].
8. Drozhzhyn, O., Koskina, Y. (2021). The model of container feeder line organization focused on the nature and parameters of external container flows. *Komunikácie*, 23 (2). DOI: 10.26552/com.C.2021.2.A94-A102.
 9. Vyshnevskiy, D., Vyshnevskaya, O., Onyshchenko, S. (2019). Modeling of the distribution of the vessels' time budget under long-term freight contracts within conditions of uncertainty. *Development of Management and Entrepreneurship Methods on Transport*, 69 (4), 15–25. DOI: 10.31375/2226-1915-2019-4-15-25.
 10. Kirillova, O.V. (2014). On the question of substantiating the distribution of container flows between vessels serving the trunk-feeder line [Do pytannya obgruntuvannya rozpodilu konteyneropotokiv mizh sudnami, obsluhovuyuchymy mahistralno-fidernoyi liniy]. *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*, 2 (11), 55–68 [in Ukrainian].
 11. Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B., Ronen, D. (2013). Ship routing and scheduling in the new millennium. *European Journal of Operational Research*, 228 (3), 467–483.
 12. La Scalia, G., Mancini, S., Adelfio, L., Giallanza, A. (2023). Development of a Vessel Scheduling Optimization Model to improve Maritime Transport sustainability. *Sustainable Futures*, 6, 100123. DOI: 10.1016/j.sftr.2023.100123.
 13. Meng, Q., Wang, S., Andersson, H., Thun, K. (2014). Containership Routing and Scheduling in Liner Shipping: Overview and Future Research Directions. *Transportation Science*, 48, 265–280. DOI: 10.1287/trsc.2013.046 1.
 14. Henry, S.M., Hoffman, M.J., Waddell, L.A., Muldoon, F.M. (2023). Holistic fleet optimization incorporating system design considerations. *Naval Research Logistics (NRL)*, 70 (7), 675–690.
 15. Ksciuk, J., Kuhlemann, S., Tierney, K., Koberstein, A. (2023). Uncertainty in maritime ship routing and scheduling: A Literature review. *European Journal of Operational Research*, 308 (2), 499–524. DOI: 10.1016/j.ejor.2022.08.006.
 16. Legros, B., Bouchery, Y., Fransoo, J.A. (2019). Time-Based Policy for Empty Container Management by Consignees. *Production and Operations Management*, 28, 1503–1527. DOI: 10.1111/poms.12996.
 17. Chien-Chang Chou, Rong-Hua Gou, Chaur-Luh Tsai, Ming-Cheng Tsou, Chun-Pong Wong, Hui-Lin Yu. (2010). Application of a mixed fuzzy decision making and optimization programming model to the empty container allocation. *Applied Soft Computing*, 10 (4), 1071–1079. DOI: 10.1016/j.asoc.2010.05.008.

Дата першого надходження рукопису до видання: 24.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.08.2025

Дата публікації: 30.10.2025

ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДТРИМКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ:
АНАЛІТИКА ТА ВЕКТОРИ РОЗВИТКУ

Д.І. Скуріхін¹, А.О. Ловська², В.Г. Равлюк³, А.В. Рибін⁴

¹ канд. техн. наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції,
Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-3746-5157

² д-р техн. наук, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції,
Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-8604-1764

³ д-р техн. наук, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції,
Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-4818-9482

⁴ канд. техн. наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції,
Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-4430-8018

Анотація

Вступ. У багатьох наукових публікаціях підкреслюється важливість впровадження сучасних цифрових технологій в управління технічними системами, зокрема у сфері залізничного транспорту. Проте специфіка життєвого циклу рухомого складу потребує комплексного підходу, який поєднує інженерні рішення, інформаційні технології, організаційне забезпечення та вимоги до безпеки руху. У наукових джерелах дедалі частіше порушується питання адаптації таких підходів для галузей із дискретним виробництвом і високим рівнем регуляції, як-от вагонобудування. **Мета.** Ця стаття розширює аналіз інтегрованих технологій управління життєвим циклом залізничного рухомого складу, що охоплює етапи від проектування до утилізації. Метою є систематизація актуальних цифрових рішень, оцінка їх впливу на ефективність, безпеку та прозорість виробничих і експлуатаційних процесів, а також визначення напрямів їх подальшої адаптації до умов країни із перехідною економікою. **Результати.** Було проаналізовано набір сучасних технологій, які використовуються на кожному етапі життєвого циклу вагона. На етапі проектування застосовуються PLM-системи, CAD / CAE-середовища, моделювання навантажень і життєвого циклу. У виробництві важливими є MES, ERP, RFID, адитивне виготовлення та AI-контроль якості; у статті наведено приклади практичного впровадження таких рішень провідними компаніями (SNCF, Alstom, CAF). Експлуатаційний етап охоплює застосування IoT, цифрових двійників, телематики, систем управління парком і аналітики даних. Технічне обслуговування розвивається в напрямі прогностичного підходу з використанням AI, смарт-контрактів і цифрових паспортів. Етап модернізації потребує впровадження PLM, 3D-сканування, управління застаріванням і обґрунтованого вибору компонентів. Фінальний етап – утилізація та

повторне використання – оцінюється через LCA-аналіз, матеріальне трасування та рівень придатності до переробки. Особливу увагу приділено хмарним рішенням, смарт-контрактам й блокчейн-інфраструктурі, що об'єднують усі фази у єдину цифрову систему керування історією вагона. **Висновки.** У цій статті показано, що інтегроване управління життєвим циклом залізничного рухомого складу є ключовою умовою для підвищення ефективності експлуатації та безпеки руху. Цифрові технології забезпечують зменшення витрат, прискорення виробничих і сервісних процесів, а також повну трасованість компонентів. Виявлено перспективність подальших досліджень у напрямі локалізації Smart MES-рішень, впровадження blockchain у технічне обслуговування, а також формування цифрових архівів компонентів для модернізації. Обґрунтовано необхідність стандартизації підходів до управління даними й адаптації світових практик до особливостей вагонобудування в країнах з перехідною економікою.

Ключові слова: життєвий цикл, рухомий склад, цифровий двійник, вагонобудування, технічне обслуговування, блокчейн, 3D-друк, PLM, IoT.

DIGITAL TECHNOLOGIES IN THE LIFECYCLE MANAGEMENT OF RAILWAY ROLLING STOCK: ANALYTICAL OVERVIEW AND DEVELOPMENT PATHS

D.I. Skurikhin¹, A.O. Lovska², V.H. Ravlyuk³, A.V. Rybin⁴

¹ PhD, Associate Professor of the Department of Wagon Engineering and Product Quality,
Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-3746-5157

² Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of Wagon Engineering and Product Quality,
Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-8604-1764

³ Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of Wagon Engineering and Product Quality,
Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-4818-9482

⁴ PhD, Associate Professor of the Department of Wagon Engineering and Product Quality,
Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-4430-8018

Summary

Introduction. Numerous scientific publications emphasize the importance of integrating modern digital technologies into the management of technical systems, particularly in the railway sector. However, the specifics of the railway rolling stock lifecycle require a comprehensive approach that combines engineering solutions, information technologies, organizational processes, and safety requirements. Recent literature increasingly addresses the need to adapt such integrated models to discrete manufacturing industries with a high level of regulation, such as railcar production. **Purpose.** This article expands the analysis of integrated lifecycle management technologies for railway rolling stock, covering all stages from design to disposal. The objective is to systematize current digital tools, evaluate their impact on efficiency, safety, and process transparency, and identify directions for adaptation in countries with transition economies. **Results.** A wide range

of technologies used at each lifecycle stage of railcars has been analyzed. The design stage relies on PLM systems, CAD/CAE platforms, and simulation tools for loads and lifecycle assessment. The manufacturing stage is supported by MES, ERP, RFID/Barcode systems, additive manufacturing, and AI-based quality control, with real-world examples from SNCF, Alstom, and CAF. The operation stage incorporates IoT sensors, digital twins, telematics, fleet management, and big data analytics. Predictive maintenance is enabled through AI, smart contracts, and blockchain-based service history records. Modernization involves PLM integration, 3D scanning, obsolescence management, and strategic replacement of components. The final stage – disposal and recycling – is supported by life cycle assessment, material tracking, and recyclability metrics. Special focus is given to cloud-based blockchain infrastructure and smart contracts that connect all lifecycle phases into a single trusted digital environment. **Conclusions.** This study demonstrates that integrated lifecycle management of railway rolling stock is essential for increasing efficiency, safety, and service life. Digital technologies enable cost reduction, faster production and maintenance cycles, and complete component traceability. Further research should focus on the localization of Smart MES systems, blockchain integration in maintenance workflows, and the creation of digital component archives for effective modernization. The paper also highlights the need to standardize data management practices and adapt global solutions to the specific context of railcar manufacturing in transition economies.

Key words: lifecycle, rolling stock, digital twin, railcar manufacturing, maintenance, blockchain, 3D printing, PLM, IoT.

Список скорочень і абрєвіатур

ABAQUS – Finite Element Analysis Software (програмний комплекс для скін-чно-елементного аналізу)

AI – Artificial Intelligence (штучний інтелект)

AIP – Application Integration Platform (платформа інтеграції застосунків)

AM – Additive Manufacturing (адитивне виробництво, 3D-друк)

ANOVA – Analysis of Variance (дисперсійний аналіз)

ANSYS – Engineering Simulation Software (програмний комплекс для інженерного моделювання)

CAD – Computer-Aided Design (система автоматизованого проектування)

CAE – Computer-Aided Engineering (система автоматизованої інженерії)

CAF – Common Assessment Framework (загальна рамка оцінювання)

CNN – Convolutional Neural Network (згортова нейронна мережа)

DED – Directed Energy Deposition (адитивна технологія наплавлення матеріалу)

DMU – Digital Mock-Up (цифровий макет)

DSTA – Defence Science and Technology Agency (Агентство науки і технологій оборони, Сінгапур)

ELRS – European Locomotive and Railcar Standard (європейський стандарт локомотивів і моторвагонів)

EMU – Electric Multiple Unit (електропоїзд)

ERF – Error Reduction Factor (коефіцієнт зменшення похибки)

ERP – Enterprise Resource Planning (система планування ресурсів підприємства)

FDM – Fused Deposition Modeling (адитивна технологія пошарового наплавлення пластику)

FEA – Finite Element Analysis (скінченно-елементний аналіз)

GIS – Geographic Information System (геоінформаційна система)

KTH – Royal Institute of Technology (Королівський технологічний інститут, Швеція)

LCA – Life Cycle Assessment (оцінка життєвого циклу)

MES – Manufacturing Execution System (система диспетчеризації виробництва)

MRF – Magnetorheological Fluid (магнітореологічна рідина)

OMC – Operations and Maintenance Center (центр експлуатації та обслуговування)

OPC-UA – Open Platform Communications Unified Architecture (відкрита уніфікована архітектура для обміну даними)

ORCID – Open Researcher and Contributor ID (ідентифікатор дослідника ORCID)

PHM – Prognostics and Health Management (прогнозування й управління технічним станом)

PLM – Product Lifecycle Management (управління життєвим циклом продукції)

RFID – Radio Frequency Identification (радіочастотна ідентифікація)

RFID-GIS – Integration of RFID with GIS (інтеграція радіочастотної ідентифікації з геоінформаційною системою)

RNN – Recurrent Neural Network (рекурентна нейронна мережа)

RUL – Remaining Useful Life (залишковий ресурс)

SCM – Supply Chain Management (управління ланцюгами постачання)

SLM – Selective Laser Melting (селективне лазерне плавлення)

SNCF – Société Nationale des Chemins de fer Français (Національна компанія французьких залізниць)

TBS – Technology-Based Solution (технологічне рішення)

TGA – Thermogravimetric Analysis (термогравіметричний аналіз)

TTO – Technology Transfer Office (офіс трансферу технологій)

UNIFE – Association of the European Rail Supply Industry (Асоціація європейської залізничної промисловості)

WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing (адитивне виробництво з дуговим наплавленням дроту)

WIP – Work in Progress (робота в процесі виконання)

Вступ. Управління життєвим циклом (ЖЦ) залізничного рухомого складу в умовах цифрової трансформації транспортної галузі стає одним із ключових факторів забезпечення ефективності, надійності й економічної доцільності експлуатації технічно складних систем. З огляду на тривалу тривалість служби вагонів, їхню складну структуру, багатоетапність обслуговування та залучення різних суб'єктів на кожному етапі – від проектування до утилізації – актуальним є впровадження комплексних цифрових рішень, які забезпечують наскрізний контроль, аналітику та трасування життєвого циклу.

Світовий досвід свідчить про зростаючу роль таких технологій, як PLM-системи, цифрові двійники, адитивне виробництво, системи управління виробництвом (MES), сенсорні мережі (IoT) та блокчейн, у забезпеченні прозорості життєвого циклу, зниженні витрат, прискоренні процесів модернізації та прийнятті обґрунтованих рішень щодо обслуговування. Водночас багато із цих рішень залишаються недостатньо адаптованими до реалій вагонобудування країн із перехідною економікою, де існує потреба у гнучких, масштабованих і економічно обґрунтованих рішеннях.

Постановка проблеми. Попри наявність окремих технологічних рішень для окремих етапів життєвого циклу вагонів, спостерігається нестача системного підходу до їх інтеграції у єдине інформаційне середовище. Відсутність єдиної цифрової екосистеми призводить до втрати даних між етапами, ускладнює траєкторію компонентів, обмежує прогнозу аналітику та знижує ефективність технічного обслуговування.

Наукове та практичне значення проблеми полягає в необхідності:

- узагальнення світових та вітчизняних підходів до впровадження інтегрованих технологій управління ЖЦ рухомого складу;
- ідентифікації технологій, які забезпечують максимальну цінність на кожному етапі ЖЦ;
- оцінки доцільності впровадження цих технологій у середовищах з обмеженим доступом до ресурсів або застарілою інфраструктурою.

Таким чином, постає наукове завдання – проаналізувати сучасні інструменти цифрового управління життєвим циклом вагонів, визначити їх потенціал для комплексної інтеграції та сформулювати рекомендації щодо впровадження в умовах сучасного вагонобудування.

Формулювання цілей статті. Метою статті є здійснення аналітичного узагальнення сучасних технологічних рішень, що застосовуються на різних етапах життєвого циклу залізничного рухомого складу, з акцентом на їх інтеграцію у єдине інформаційне середовище. Публікація має характер первинного дослідження в межах науково-дослідної роботи «Підвищення безпеки руху залізничного рухомого складу шляхом впровадження інтегрованих технологій підтримки життєвого циклу» (№ ДР 0125U001907).

Виклад основного матеріалу. Інтегровані технології управління життєвим циклом залізничних вагонів – це сукупність цифрових, інженерних та організаційних рішень, які дають можливість ефективно управляти вагонами на всіх етапах їхнього життєвого циклу: від проєктування до утилізації.

Основні етапи життєвого циклу залізничного вагона наведено на рис. 1. Технології кожного з етапів ЖЦ розкрито нижче.

Етап проєктування

На етапі проєктування, де основною метою є створення ефективного, надійного й довговічного вагона, застосовуються такі технології:

- CAD / CAE-системи (наприклад AutoCAD, SolidWorks, ANSYS) – комп'ютерне моделювання конструкції;
- PLM-системи – це спеціалізовані IT-рішення, що забезпечують централізоване управління всією технічною інформацією, пов'язаною з проєктуванням,



Рис. 1. Основні етапи ЖЦ залізничного вагона

виробництвом, модернізацією та технічним обслуговуванням залізничного вагона;

- Digital Twin (на етапі проекту) – віртуальний прототип для моделювання навантажень і поведінки в експлуатації;
- Life Cycle Assessment (LCA) – екологічна й економічна оцінка всього життєвого циклу вагона.

Аналіз наукових праць, присвячених проектуванню вагонів, виявляє низку актуальних напрямів [1; 2; 3]:

- Оптимізація геометрії несучих елементів вагонів, зокрема впровадження круглих труб у конструкціях платформ і хоперів для зменшення маси та підвищення міцності.
- Моделювання динамічних навантажень, які виникають під час руху поїздів, зокрема в умовах комбінованих перевезень, на поромках, крутих ухилах або на зчленованих візках.
- Аналіз жорсткості й коливань кузова з урахуванням різних схем навантаження, що важливо на етапі проектування для забезпечення довговічності конструкцій.
- Розробка моделей вантажних вагонів для контейнерних і мультимодальних перевезень з адаптацією до європейських та міжнародних габаритів.
- Розрахунок впливу швидкості руху, ударних навантажень і несиметричних навантажень на критичні елементи вагонів.

Застосовуються сучасні методи інженерного моделювання (CAD, FEA, SolidWorks Simulation), що дає змогу враховувати ці фактори вже на ранньому етапі створення технічної документації та специфікацій. Такий підхід суттєво покращує обґрунтованість технічних рішень ще до запуску виробництва.

Етап виробництва

На етапі виробництва метою є забезпечення якісного виготовлення згідно зі специфікацією, для цього застосовуються такі цифрові технології – рис. 2.



Рис. 2. Цифрові технології на етапі виготовлення

Управління виробництвом залізничного рухомого складу потребує високої синхронізації між основним виробником, постачальниками та субпідрядниками. У публікації Matenga & Mrofu (2022) [4] представлено приклад реалізації блокчейн-орієнтованої хмарної виробничої системи (BCMaas), яка дає змогу ефективно управляти процесами аутсорсингового виробництва компонентів вагонів.

На базі Hyperledger Fabric, Kubernetes та DevOps-інфраструктури побудовано розподілену систему управління виробництвом із можливістю динамічного масштабування, реєстрації всіх виробничих подій та фіксації якості частин. Усі ключові транзакції (замовлення, доставка, приймання, контроль якості) здійснюються через смарт-контракти, що мінімізує людський фактор і забезпечує незмінність виробничої історії.

Особливо важливим є впровадження QR-кодів і цифрових ідентифікаторів, які дають змогу трасувати кожен компонент вагона – від виготовлення до встановлення. Це забезпечує контроль якості, зниження витрат на аудит і готовність до цифрового сервісного обслуговування після виробництва.

Таким чином, блокчейн у поєднанні з хмарними сервісами виступає як інтеграційна технологія, що пов'язує виробничі операції з подальшими етапами життєвого циклу.

Kim et al. (2019) [5] запропонували модель Smart MES для підприємств, що виготовляють рухомий склад. Її особливість – адаптація до потреб складного дискретного виробництва, типового для вагонобудування.

Основні функції:

- збір даних з обладнання в реальному часі (через OPC-UA);
- автоматичне відстеження деталей і матеріалів (ZigBee-мережа);
- синхронізація MES з ERP для наскрізного контролю постачання, складу та виробничих завдань.

Запропонована архітектура дає можливість:

- скоротити час простоїв на лінії через оперативне виявлення збоїв;
- унеможливити ручне введення даних (і пов'язані з цим помилки);
- мати актуальний статус кожної деталі, вузла чи складання у виробничому циклі.

Для вагонобудівних заводів це означає можливість реального цифрового виробництва: інтеграція MES з ERP, автоматичне формування маршрутів WIP (виробів у процесі) та контроль якості поетапно.

Аддитивне виробництво (AM) дедалі активніше впроваджується на етапі виготовлення залізничного рухомого складу. У дослідженні Gomes & de Jesus (2024) [6] проаналізовано низку практичних кейсів використання технологій 3D-друку, зокрема для виготовлення запасних частин, ремонту великих компонентів та створення нових, оптимізованих конструкцій.

Особливу увагу приділено компаніям SNCF, Alstom, CAF та іншим гравцям, які інтегрували AM у виробничі процеси. Наприклад, SNCF скоротила час постачання запчастин на 85 %, а Alstom знизила вартість окремих деталей до 80–90 %.

Компанії успішно виготовляли корпуси, направляючі для кабелів, ручки, сидіння й елементи ходових частин, включно з деталями візка, амортизаторами, антирол-опорами тощо.

AM дає змогу застосовувати модульність і топологічну оптимізацію, що сприяє зменшенню ваги компонентів на 30–70 % без втрати міцності.

Використання FDM, SLM і DED-технологій надає можливість не лише друкувати запасні частини, а й ремонтувати великі вузли (наприклад, осі або колеса) за допомогою лазерного наплавлення (laser cladding), скорочуючи витрати на заміну дорогих деталей.

Крім того, автори підкреслюють важливість впровадження AM у виробництво форм і шаблонів, а також у розробку решітчастих конструкцій, що відкриває шлях до ще вищої ефективності конструкцій кузовів високошвидкісних поїздів.

У роботі Muvunzi et al. (2022) [7] досліджено можливість локального виробництва вузлів вагонів за допомогою WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing). Як кейс вибрано тягове з'єднання (traction link) – компонент візка, що передає тягове зусилля й ізолює вібрації.

Для виготовлення цього вузла порівнювались три матеріали:

- Aluminium 7075;
- Ti6Al4V (титан);
- A36 (вуглецева сталь).

Усі зразки моделювались у ABAQUS CAE з урахуванням статичних і теплових навантажень. Ключові результати:

- навантаження до 33 МПа не призводили до залишкової деформації в жодному матеріалі;
- Ti6Al4V мав найвищий показник «міцність / густина», але найменший тепловий потік;
- Al 7075 показав найвищу стійкість до термічного впливу та низькі напруження, що впливає на зменшення ваги;
- WAAM визнано доцільною технологією для виготовлення деталей середньої складності без високих вимог до точності.

Таким чином, Al 7075 та Ti6Al4V рекомендовані як перспективні матеріали для 3D-друку вагонних компонентів із фокусом на легкість, міцність і теплову стійкість. Робота демонструє технічну й економічну доцільність упровадження адитивних технологій для локального виробництва в умовах обмеженого доступу до запчастин.

У дослідженні Kraus & Folinas (2022) [8] аналізується вплив MES-систем на дискретне виробництво, зокрема вагонобудування. Опитування 84 компаній показало такі результати:

- у 93 % випадків MES зменшила простой обладнання (зварювальні станції, фарбувальні камери);
- у 82 % – скоротила виробничий цикл складання кузова та візків;
- у 75 % – покращила точність обліку матеріалів і запасів;
- інтеграція MES з ERP зменшила втрати сировини на 21 %.

Для вагонобудування критично важливими є трасування компонентів, контроль якості в реальному часі та індивідуальний облік кожного вагона, що реалізується через MES.

Етап експлуатації

На етапі експлуатації метою є підтримання технічної справності й надійності вагонів з мінімальними ризиками безпеки руху та зносом. Можна виділити такі технології – рис. 4.

Одним із ключових напрямів розвитку експлуатаційного етапу управління життєвим циклом залізничного рухомого складу є впровадження цифрових двійників як інтеграційної платформи для моніторингу, аналізу та прогнозування технічного стану поїздів у реальному часі.

У публікації Wei Dong et al. (2025) [9] представлено архітектуру цифрового поїзда для високошвидкісних електропоїздів типу EMU, яка реалізована на основі концепції Digital Twin. Автори пропонують повну функціональну, інформаційну та сервісну архітектуру цифрового поїзда, що охоплює всі етапи життєвого циклу – від R&D до експлуатації.

Особливу увагу приділено візкам (digital bogie): розроблено високоточні симуляційні моделі динаміки, структурної міцності та зносу на основі даних, що надходять із сенсорів (температура, вібрація, навантаження). Для обробки даних та реалізації прогнозної аналітики використано нейромережеві підходи – RNN, CNN, AutoEncoder, що забезпечують точне передбачення відмов, попередження небезпечних навантажень і контроль стабільності руху.

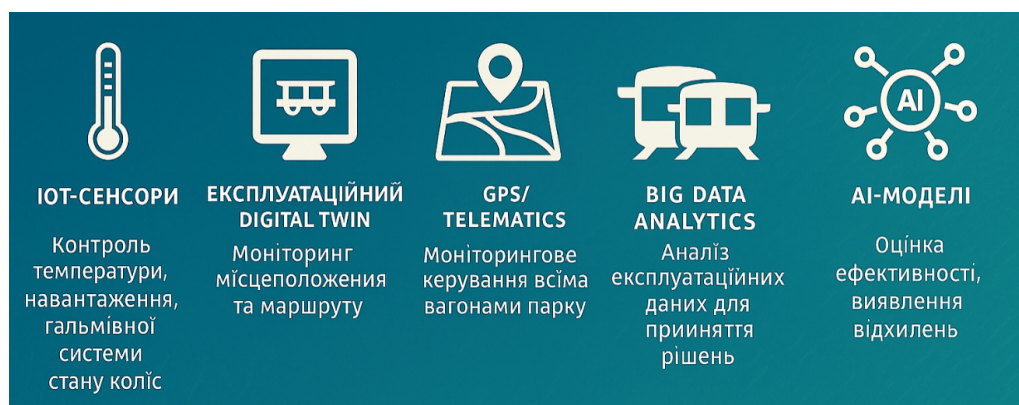


Рис. 4. Цифрові технології на етапі експлуатації

Архітектура цифрового поїзда також містить модулі Prognostics and Health Management (PHM), які інтегрують реальні дані з експлуатації із симуляційними моделями для оцінки залишкового ресурсу, планування технічного обслуговування й оптимізації маршрутів. Таке рішення демонструє потенціал цифрових двійників як основи для інтегрованого керування життєвим циклом у реальному часі.

Використання RFID для оперативного моніторингу рухомого складу. RFID-технології демонструють високий потенціал на етапі експлуатації залізничного рухомого складу, особливо в контексті точного позиціонування, контролю стану вузлів та оптимізації інтервалів технічного обслуговування.

1. Позиціонування рухомого складу (Olaby et al., 2022)

У статті [10] запропоновано RFID-систему для визначення місцеположення рухомого складу з точністю до 1 м, що значно перевищує точність GPS у тунелях або щільній інфраструктурі.

Ключові аспекти:

- пасивні RFID-мітки встановлюються вздовж колії; зчитувачі на транспортному засобі дають змогу синхронізувати положення з об'єктами інфраструктури (стрілки, зупинки);
- систему протестовано на тестовій ділянці з реалістичними умовами міської залізниці.

Це дає можливість інтегрувати RFID у системи автоматичного управління рухом і цифрового моніторингу маршрутів.

2. Оперативний моніторинг технічного стану

У публікації [11] описано інтегровану систему RFID + GIS, орієнтовану на моніторинг стану візків (ходових частин) у режимі реального часу.

Основні рішення:

- встановлення температурних і вібраційних пасивних міток на електродвигунах і редукторах;
- побудова оптимального плану розміщення зчитувачів за допомогою алгоритму Gradient-Based Cuckoo Search;
- реалізація моніторингу на реальному вокзалі в Куала-Лумпурі (TBS), покриття 98,9 % міток із 10 зчитувачами.

Система надає можливість:

- визначати стан нагріву та вібрації під час кожної зупинки поїзда;
- попереджати про перевищення критичних значень, що може спричинити поломки;
- зменшити витрати на діагностику та запобігти позаплановому обслуговуванню.

У публікації [12] запропоновано метод акустичного моніторингу для виявлення дефектів колісних пар під час руху вагона. Автори вперше класифікували джерела шуму під час руху та визначили інформативні діагностичні ознаки за акустичним сигналом із використанням перетворення Гільберта. На основі експериментальних досліджень було створено модель пристрою, що дає змогу зменшити кількість сенсорів на вагон і підвищити надійність їх роботи.

Етап технічного обслуговування

На етапі технічного обслуговування, основною метою якого є запобігання відмовам під час експлуатації і простою зі збереженням ресурсу, застосовуються такі технології – рис. 5.

Управління експлуатацією залізничного рухомого складу потребує не лише постійного моніторингу технічного стану, а й гарантованої достовірності інформації про проведені роботи з техобслуговування та ремонтів. Особливо це актуально для вагонів, які проходять багаторазові цикли експлуатації, передачі між операторами або підприємствами з ремонту.

У цьому контексті важливим є підхід, представлений у статті Matenga et al. (2023) [13], де запропоновано використання блокчейн-технологій у системах життєвого циклу вагонів. Автори реалізували систему на основі Hyperledger Fabric, що забезпечує незмінність даних, прозорість історії обслуговування й інтеграцію з постачальниками та виробниками частин через Supply Chain Management (SCM).

Кожна подія (наприклад, заміна елемента візка, ремонт дверей, перевірка гальмівної системи) фіксується як окрема транзакція, яка включає:

- тип втручання;
- дату / час;
- серійний номер частини (ідентифікований через QR-код);
- особу / організацію, яка виконала роботу.

Ця інформація записується у вигляді блока, що додається до ланцюга подій, формуючи повну цифрову історію вагона чи його компонента. Структура даних організована за допомогою Merkle-дерев, що дає змогу з високою точністю трасувати джерело кожної зміни – від виробництва до повторного використання чи утилізації.

Для вагонів, що передаються між операторами, це означає:

- неможливість втрати або підробки історії обслуговування;
- миттєвий доступ до сервісної інформації для нового власника;
- автоматизацію перевірок технічного стану через смарт-контракти.



Рис. 5. Цифрові технології на етапі технічного обслуговування

Таким чином, блокчейн виступає інтеграційною технологією, що зв'язує виробничий, експлуатаційний і сервісний етапи ЖЦ. Автори зазначають, що така архітектура дає можливість створити «цифровий паспорт вагона», який слугує джерелом довіри, особливо в умовах багатосторонньої взаємодії між операторами, депо, заводами з обслуговування та регуляторними органами.

Інтеграція штучного інтелекту в систему технічного обслуговування залізничного транспорту дає змогу перейти від реактивного до прогнозного обслуговування (predictive maintenance), що суттєво зменшує ризики аварій, простої та втрати ресурсу. У дослідженні Daniyan et al. (2022) [14] представлено практичну реалізацію AI-моделі для оцінки залишкового ресурсу (RUL) буксового підшипника вагона.

Методологія дослідження передбачала:

- отримання даних із температурних сенсорів у підшипнику;
- попередню обробку даних (фільтрація шумів, виявлення трендів);
- тренування алгоритму машинного навчання в середовищі MATLAB (supervised learning);
- оцінку точності моделі з використанням ANOVA, регресії та середньоквадратичної помилки;
- побудову прогнозової моделі, здатної передбачити момент переходу підшипника до стану деградації.

AI-модель показала, що підшипник має залишковий ресурс близько 500 годин або 42 дні експлуатації перед настанням відмови. Було виявлено, що ознаки деградації з'являються на 41-й день використання – відповідно до поведінки температурного тренду. Прогнозна модель також формувала границі довіри, які звужуються з наближенням відмови.

Ця система дає можливість:

- завчасно виявляти відхилення;
- будувати адаптивні графіки технічного обслуговування;
- уникати непередбачених зупинок;
- інтегрувати отриману інформацію в дашборди операторів або системи тривоги сигналізації.

Ключовою особливістю дослідження є поєднання AI, смарт-сенсорів та IoT, що забезпечує циклічний збір, обробку й використання даних у реальному часі для підтримки прийняття рішень щодо стану техніки.

Етап капітальних ремонтів і модернізації

На етапі ремонту та модернізації, де метою є продовження строку служби та відповідність новим стандартам, можуть застосовуватись такі технології – рис 6.

У роботі Wang (2023) [15] розглянуто комплексний підхід до управління застаріванням компонентів у процесі обслуговування та модернізації рухомого складу. Застарівання визначається як відсутність доступу до підтримки, запчастин або оновлень, необхідних для підтримки працездатності системи. Це особливо актуально на стадії капітального ремонту, коли багато вагонів експлуатуються понад 30 років.

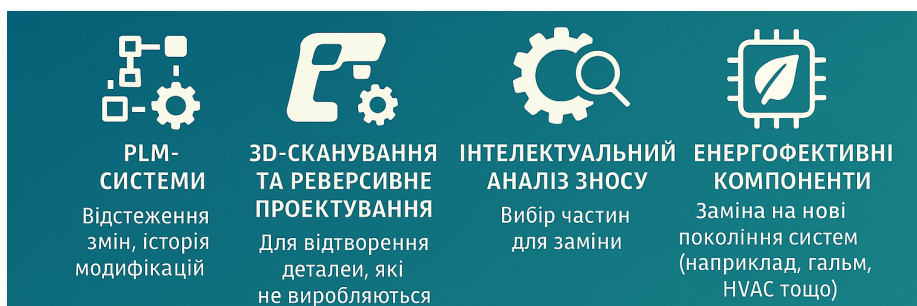


Рис. 6. Цифрові технології на етапі ремонту і модернізації

Ключові акценти дослідження:

Запропоновано цикл управління застаріванням (ОМС): ① ідентифікація → ② оцінка критичності → ③ аналіз ризику → ④ розробка стратегії → ⑤ реалізація та моніторинг.

Уведено концепцію «проміжку часу до застарівання» (Time to Obsolescence, ТТО) для прогнозування, коли компонент втратить підтримку.

Використано інтерв'ю з експертами Alstom, CAF, Bombardier: основні виклики – відсутність даних про компоненти, залежність від постачальників, відсутність довгострокового планування.

Акцент на прозорості даних у PLM-системах і потребі в цифровому архівуванні ще на виробничому етапі.

Запропоновано класифікацію рішень: заміна 1:1, функціональний аналог, редизайн вузла, імпорт замінника.

Для фази overhaul/refit запропонований підхід дає змогу:

- уникнути незапланованих витрат на пошук або відновлення критичних вузлів;
- враховувати кількісний ризик відмов у майбутньому;
- впровадити довгострокові контракти або цифрове дублювання запасних частин.

Це дослідження підкреслює, що ефективне управління застаріванням має стати інтегрованою частиною стратегії продовження ресурсу рухомого складу, особливо в разі модернізації парку на 20+ років експлуатації.

Етап утилізації та повторного використання.

На етапі утилізації та повторного використання, де метою є екологічне завершення циклу та повторне використання частин вагонів, застосовуються такі технології – рис. 7.

Управління завершальним етапом життєвого циклу залізничного рухомого складу потребує не лише безпечної утилізації, а й максимального повторного використання матеріалів і компонентів. Одним із ключових інструментів на цьому етапі є оцінка перероблюваності (recyclability) та відновлюваності (recoverability) згідно з методологіями, рекомендованими UNIFE.

У дослідженні Delogu et al. (2017) [16] проведено порівняльний аналіз трьох типів транспортних засобів: Metro (Alstom), Diesel Multiple Unit – DMU (Stadler), High-Speed Train (AnsaldoBreda) із застосуванням єдиного підходу до розрахунків recyclability/recoverability на основі маси, типу матеріалів і сценарію демонтажу. Результати наведені в табл. 1.



Рис. 7. Цифрові технології на етапі утилізації та повторного використання

Таблиця 1

Результати дослідження

Тип поїзда	Recyclability (%)	Recoverability (%)
Metro	87,8	97,2
DMU	85,6	94,6
High-Speed Train	83,3	93,4

Дослідження показало, що:

- основу високих показників становлять чорні й кольорові метали, які переважають у вагонній рамі, ходових частинах та обшивці;
- упровадження композитів і полімерів у конструкції (особливо у високошвидкісному поїзді) знижує показники recyclability, оскільки такі матеріали погано придатні до переробки;
- визначальним чинником є глибина демонтажу: докладніша розборка дає вищу точність сортування та більше повернення ресурсів у вторинний обіг.

Результати демонструють, що проектування вагонів має передбачати оцінку придатності до утилізації ще на ранніх стадіях з урахуванням типу матеріалів, доступу до компонентів і потенціалу вторинного використання.

У дослідженні Ramos da Silva et al. (2023) [17] виконано повний оціночний аналіз життєвого циклу (LCA) для португальської залізничної мережі з прогнозом до 2050 року. Хоча основна увага зосереджена на інфраструктурі й енергетиці, окремо проаналізовано вплив рухомого складу на загальний екологічний слід системи.

Рухомий склад у структурі впливу на екологію:

- У 2019 році рухомий склад становив ~22 % загального вуглецевого сліду в сегменті експлуатації.
- На етапі утилізації вагонів – основні джерела викидів: виробництво й обробка сталевих конструкцій, синтетичні матеріали, а також компоненти з високою енергомісткістю (трансформатори, акумулятори, системи приводу). Зростаюча частка алюмінієвих і композитних матеріалів покращує

енергоефективність, але ускладнює переробку та збільшує вплив на довкілля після списання.

Ключові сценарії:

- Перехід до легших конструкцій та відновлюваних матеріалів може зменшити викиди CO₂ на 18–23 % на одиницю рухомого складу.
- Використання вторинної сировини (переробленого алюмінію, сталі) на етапі виробництва та оновлення знижує загальну шкоду довкіллю на 11–15 %.
- Результати підтверджують доцільність включення LCA-оцінки у фазу проектування вагонів для забезпечення екологічно безпечного завершення ЖЦ.

Таким чином, навіть у загальному інфраструктурному дослідженні роль рухомого складу у формуванні екологічного балансу на фінальних етапах життєвого циклу залишається суттєвою, особливо в контексті циркулярної економіки та стратегій декарбонізації.

У дослідженні Lee et al. (2020) [18] проведено емпіричне демонтажне дослідження пасажирського вагона високошвидкісного поїзда (ELRS) відповідно до стандарту ISO 21106. З урахуванням коефіцієнтів ефективності переробки (MRF) і енергетичного відновлення (ERF) визначено такі показники:

- Recyclability – 84,8 %;
- Recoverability – 88,3 %.

Особливості дослідження:

- Аналіз охопив 37 тонн матеріалів, з яких понад 81 % припадає на метали, решта – на полімери, скло, електроніку тощо.
- Найбільших трудовитрат потребував демонтаж ходових частин, кузова й підлоги (до 32 людино-годин на етап).
- Для визначення ERF були проведені експерименти на калориметрі та TGA для панелей, пін, ізоляцій і покриттів (ERF: від 4,8 до 75,8 %).
- Різниця у втраті маси після згоряння навіть у схожих матеріалах (наприклад, фенольних панелях) підтвердила потребу в індивідуальному підборі коефіцієнтів для кожного виробу.

Також наголошено, що застосування застарілих коефіцієнтів UNIFE без адаптації до сучасної практики призводить до спотворення оцінки. Автори рекомендують розробникам рухомого складу враховувати легкість демонтажу, сумісність матеріалів та відгуки переробників ще на етапі проектування.

Висновки та перспективи подальших досліджень. За результатами аналізу сучасних цифрових технологій, що застосовуються на різних етапах ЖЦ рухомого складу, встановлено, що найбільш перспективними з позиції інтеграції є:

- PLM-системи для наскрізного управління технічною інформацією;
- MES- і ERP-платформи для синхронізації виробничих процесів;
- IoT-сенсори й цифрові двійники для моніторингу технічного стану в реальному часі;
- блокчейн і смарт-контракти – як механізм забезпечення прозорості, довіри та незмінності технічної історії.

Актуальними напрямками подальших досліджень є:

- моделювання інтегрованих архітектур управління ЖЦ з урахуванням міжетапної синхронізації;

- розробка методик адаптації світових рішень до галузей із застарілою інфраструктурою;
- формування цифрового паспорта вагона як бази для прийняття рішень в експлуатації, обслуговуванні та модернізації;
- порівняльний аналіз вартості володіння у традиційній та цифрово-орієнтованій моделях життєвого циклу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Вагуля Г., Фомін О., Ловська А., Скуріхін Д., Нерубацький В., Левченко Я., Краснокутський Є. Analysis of the stress state of a Hopper-Type container under operational loads. *AIP Conference Proceedings*. 2024. Т. 3064, № 1. 060005. DOI: 10.1063/5.0198808.
2. Lovska A., Fomin O., Szymański G.M., Skurikhin D. Determination of the Loading of an Open Car with Filler in the Center Sill. In: Awrejcewicz J. (ed.) *Perspectives in Dynamical Systems I – Applications*. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics. 2024. Vol. 453. DOI: 10.1007/978-3-031-56492-5_24.
3. Fomin O., Lovska A., Skurikhin D., Nerubatskyi V., Sushko D. Special features of the vertical loading on a flat car transporting containers with elastic-viscous links in their interaction units. *Transport Means – Proceedings of the 26th International Scientific Conference Transport Means 2022*. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2022. P. 629–633. DOI: 10.1063/5.0198807.
4. Matenga A.E., Mpofu K. Blockchain-Based Cloud Manufacturing SCM System for Collaborative Enterprise Manufacturing: A Case Study of Transport Manufacturing. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12 (17). Article 8664. DOI: 10.3390/app12178664.
5. Kim T.H., Jeong J., Kim Y. A Conceptual Model of Smart Manufacturing Execution System for Rolling Stock Manufacturer. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 151. P. 600–606. DOI: 10.1016/j.procs.2019.04.081.
6. Gomes V.M.G., de Jesus A.M.P. Additive Manufacturing in the Railway Rolling Stock: Current and Future Perspective. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 53. P. 285–290. DOI: 10.1016/j.prostr.2024.01.035.
7. Muvunzi R., Mpofu K., Daniyan I. A., Adeodu A. O. Analysis of potential materials for local production of a rail car component using Additive Manufacturing. *Heliyon*. 2022. Vol. 8 (7). e09405. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09405.
8. Kraus M., Folinas D. The Impact of a Manufacturing Execution System on Supply Chain Performance. *International Journal of Applied Logistics*. 2022. Vol. 12 (1). DOI: 10.4018/IJAL.286160.
9. Wei Dong, Kexin Sun, Bochuan Ding, Jilei Yin. Exploration and practice of high speed EMU digital train based on digital twin. *High-speed Railway*. 2025. No. 3. P. 54–63. DOI: 10.1016/j.hspr.2025.01.004.
10. Olaby O., Hamadache M., Soper D., Winship P., Dixon R. Development of a Novel Railway Positioning System Using RFID Technology. *Sensors*. 2022. Vol. 22 (6). Article 2401. DOI: 10.3390/s22062401.

11. Talib N.H., Hasnan K., Nawawi A., Abdullah H. Real-Time Transportation Monitoring Using an Integrated RFID-GIS Scheme. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018. Vol. 9 (13). P. 1–13. URL: <https://www.researchgate.net/publication/330353163>.
12. Бондаренко В. В., Скуріхін Д. І., Візньак Р. І., Равлюк В. Г., Скуріхін В. І. Experimental study of the method and device for wheel-sets acoustic monitoring of railway cars in motion. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2019. № 4. С. 30–36. DOI: 10.29202/nvngu/2019-4/7.
13. Matenga A.E., Mporfu K. Blockchain-based Product Lifecycle Management using Supply Chain Management for Railcar Remanufacturing. *Procedia CIRP*. 2023. Vol. 116. P. 486–491. DOI: 10.1016/j.procir.2023.02.082.
14. Daniyan I., Mporfu K., Muvunzi R., Uchegbu I.D. Implementation of Artificial Intelligence for Maintenance Operation in the Rail Industry. *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 109. P. 449–453. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.277.
15. Wang Y. Obsolescence Management for Rolling Stock Asset. Master's thesis. KTH Royal Institute of Technology, Sweden, 2023. URL: <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1920231/FULLTEXT01.pdf>.
16. Delogu M., Zanchi L., Maltese S., Bonaffini D., Pierini M. End-of-Life in the railway sector: Analysis of recyclability and recoverability for different vehicle case studies. *Waste Management*. 2017. Vol. 60. P. 439–450. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.10.008.
17. Ramos da Silva T., Moura B., Monteiro H. Life Cycle Assessment of Current Portuguese Railway and Future Decarbonization Scenarios. *Sustainability*. 2023. Vol. 15 (14). Article 11355. DOI: 10.3390/su151411355.
18. Lee C.-K., Lee J.-Y., Kim J. Recyclability and Recoverability of Rolling Stock with Recycling Efficiency Factors. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020. Vol. 155. Article 104620. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104620.

REFERENCES

1. Glib Vatulia, Oleksij Fomin, Alyona Lovska, Dmytro Skurikhin, Volodymyr Nerubatskyi, Iaroslava Levchenko, Yevhen Krasnokutskyi; Analysis of the stress state of a Hopper-Type container under operational loads. *AIP Conf. Proc.* 10 April 2024; 3064 (1): 060005 <https://doi.org/10.1063/5.0198808>.
2. Lovska, A., Fomin, O., Szymański, G.M., Skurikhin, D. (2024). Determination of the Loading of an Open Car with Filler in the Center Sill. In: Awrejcewicz, J. (eds) *Perspectives in Dynamical Systems I – Applications*. DSTA 2021. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, vol. 453. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-56492-5_24.

3. Fomin, O., Lovska, A., Skurikhin, D., Nerubatskyi, V., & Sushko, D. (2022). Special features of the vertical loading on a flat car transporting containers with elastic-viscous links in their interaction units. In *Transport Means – Proceedings of the 26th International Scientific Conference Transport Means 2022* (pp. 629–633). Kaunas University of Technology. <https://doi.org/10.1063/5.0198807>.
4. Matenga, A.E.; Mpfu, K. (2022). Blockchain-Based Cloud Manufacturing SCM System for Collaborative Enterprise Manufacturing: A Case Study of Transport Manufacturing. *Applied Sciences*, 12 (17), 8664. <https://doi.org/10.3390/app12178664>.
5. Kim, T.H., Jeong, J., Kim, Y. (2019). A Conceptual Model of Smart Manufacturing Execution System for Rolling Stock Manufacturer. *Procedia Computer Science*, 151, 600–606. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.04.081>,
6. Gomes, V.M.G., & de Jesus, A.M.P. (2024). *Additive Manufacturing in the Railway Rolling Stock: Current and Future Perspective*. *Procedia Structural Integrity*, 53, 285–290. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.01.035>,
7. Muvunzi, R., Mpfu, K., Daniyan, I.A., & Adeodu, A.O. (2022). Analysis of potential materials for local production of a rail car component using Additive Manufacturing. *Heliyon*, 8 (7), e09405. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09405>.
8. Kraus, M., & Folinas, D. (2022). The Impact of a Manufacturing Execution System on Supply Chain Performance. *International Journal of Applied Logistics*, 12 (1). <https://doi.org/10.4018/IJAL.286160>.
9. Wei Dong, Kexin Sun, Bochuan Ding, Jilei Yin. (2025). Exploration and practice of high speed EMU digital train based on digital twin. *High-speed Railway*, 3, 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.hspr.2025.01.004>.
10. Olaby, O., Hamadache, M., Soper, D., Winship, P., & Dixon, R. (2022). Development of a Novel Railway Positioning System Using RFID Technology. *Sensors*, 22 (6), 2401. <https://doi.org/10.3390/s22062401>.
11. Talib, N.H., Hasnan, K., Nawawi, A., & Abdullah, H. (2018). Real-Time Transportation Monitoring Using an Integrated RFID-GIS Scheme. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 9 (13), 1–13. Link: <https://www.researchgate.net/publication/330353163>.
12. Bondarenko, V.V., Skurikhin, D.I., Vizniak, R.I., Ravlyuk, V.H., & Skurikhin, V.I. (2019). Experimental study of the method and device for wheel-sets acoustic monitoring of railway cars in motion. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (4), 30–36. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-4/7>.
13. Matenga, A.E., Mpfu, K. (2023). Blockchain-based Product Lifecycle Management using Supply Chain Management for Railcar Remanufacturing. *Procedia CIRP* 116, 486–491. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.082>.

14. Daniyan, I., Mporfu, K., Muvunzi, R., Uchegbu, I.D. (2022). Implementation of Artificial Intelligence for Maintenance Operation in the Rail Industry. *Procedia CIRP*, 109, 449–453. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.277>.
15. Wang, Y. (2023). *Obsolescence Management for Rolling Stock Asset* (Master's thesis, KTH Royal Institute of Technology, Sweden). Retrieved from <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1920231/FULLTEXT01.pdf>.
16. Delogu, M., Zanchi, L., Maltese, S., Bonaffini, D., & Pierini, M. (2017). End-of-Life in the railway sector: Analysis of recyclability and recoverability for different vehicle case studies. *Waste Management*, 60, 439–450. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.008>.
17. Ramos da Silva, T., Moura, B., & Monteiro, H. (2023). Life Cycle Assessment of Current Portuguese Railway and Future Decarbonization Scenarios. *Sustainability*, 15 (14), 11355. <https://doi.org/10.3390/su151411355>
18. Lee, C.-K., Lee, J.-Y., & Kim, J. (2020). Recyclability and Recoverability of Rolling Stock with Recycling Efficiency Factors. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104620. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104620>.

Подяка

Це дослідження проведено в рамках науково-дослідної роботи «Підвищення безпеки руху залізничного рухомого складу шляхом впровадження інтегрованих технологій підтримки життєвого циклу» (№ ДР 0125U001907), яка виконується за кошти державного бюджету України з 2025 р.

Acknowledgements

This study was conducted as part of the research project “Advancing Train Safety Through Integrated Lifecycle Management Technologies for Railcars” State Registration No. 0125U001907), funded by the state budget of Ukraine since 2025.

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.08.2025

Дата публікації: 30.10.2025

НОТАТКИ

Наукове видання

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

Випуск 3(26), 2025

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. 7,79.
Замов. № 1125/854. Наклад 200 прим.

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 3(26), 2025

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 7,79.
Order No 1125/854. Edition of 200 copies.

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