

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКИЙ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

# РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

*Науковий журнал*

**ВИПУСК 4(27), 2025**

*Заснований у жовтні 2016 року*



Видавничий дім  
«Гельветика»  
2025

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

№ 4(27)  
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](mailto: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, Д3 Менеджмент, Д6 Секретарська та офісна справа, Г11 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;  
*Єзунов К.В.*, д.т.н., проф., ОНМУ;  
*Постан М.Я.*, д.е.н., проф., ОНМУ;  
*Кириллова О.В.*, д.т.н., проф., ОНМУ;  
*Лапкіна 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-Давідович 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  
технології 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: к.т.н., доц. Дьяконов О.С.; к.т.н., доц. Єриганов О.В.; доц. Палагута В.М.;  
д.е.н., проф. Лапкіна І.О.; к.т.н., доц. Гогоренко О.А

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 4(27), 2025**

*Founded in October 2016*



Publishing House  
"Helvetica"  
2025

ODESSA  
NATIONAL MARITIME UNIVERSITY  
TRANSPORT DEVELOPMENT  
SCIENTIFIC JOURNAL

№ 4(27)  
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. <i>Varbanets R.A.</i> , ONMU;	<i>Duhovnik Joze</i> , DSc, University of Ljubljana, Slovenia;
DSc, Prof. <i>Dubrovskiy M.P.</i> , ONMU;	<i>Gasarov V.</i> , Doctor of Engineering, Professor, Azerbaijan State Marine Academy, Azerbaijan;
DSc, Prof. <i>Yehupov K.V.</i> , ONMU;	<i>Sadigov V.</i> , PhD in Engineering, Associate Professor, Azerbaijan State Marine Academy, Azerbaijan;
DSc, Prof. <i>Postan M.Ia.</i> , ONMU;	<i>Dashkovskiy Sergey</i> , DSc, Julius-Maximilians University of Wurzburg, Germany;
DSc, Prof. <i>Kyrylova O.V.</i> , ONMU;	<i>Klyus Oleh</i> , DSc, Maritime University of Szczecin, Poland;
DSc, Prof. <i>Lapkina I.O.</i> , ONMU;	<i>Csiszar Csaba</i> , PhD, Budapest University of Technology and Economics, Hungary;
DSc, Prof. <i>Piterska V.M.</i> , ONMU;	<i>Ngoc An Minh</i> , PhD, Kochi University of Technology, Japan;
DSc, Prof. <i>Malaksiano M.O.</i> , ONMU;	<i>Medvedev Alexander</i> , DSc, Transport and telecommunication institute, Latvia;
PhD, Associate Prof. <i>Nemchuk O.O.</i> , ONMU;	<i>Popova Jelena</i> , DSc, Transport and telecommunication institute, Latvia;
PhD, Associate Prof. <i>Melnykov S.V.</i> , ONMU;	<i>Mezitis Mareks</i> , DSc, Transport Academy, Latvia;
<i>Filina-Davidovykh L.S.</i> , Doctor of Engineering, West Pomeranian University of Technology, Szczecin, Poland;	<i>Nam Kyu Park</i> , PhD, TongMyong University, South Korea.
<i>Aymelek Murat</i> , PhD, Izmir Katip Celebi University, Turkey;	
<i>Maleki Vishkaei Behzad</i> , PhD, Luiss University, Italy;	
<i>Kolmykova Anna</i> , DSc, University of Bremen, Germany;	
<i>Lyubomirov Slavi Yasenov</i> , PhD, University of Plovdiv Paisii Hilendarsk, Bulgaria;	

Reviewers: PhD (Engineering), Assoc. Prof. *Diakonov O.S.*; PhD (Engineering), Assoc. Prof. *Yeryhanov O.V.*;  
Assoc. Prof. *Palahuta V.M.*; DSc (Economics), Prof. *Lapkina I.O.*; PhD (Engineering), Assoc. Prof. *Hohorenko O.A.*

Recommended for printing by the Academic Council of Odessa National Maritime University

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

**ЕКОНОМІКА**

**О.В. Копилова**

Аналіз приватних інвестицій у суднобудуванні: світовий досвід.....7

**ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ**

**Н.І. Александровська, М.Б. Косой, О.В. Демідюк**

Експериментальне дослідження динаміки великотоннажного балкера,  
пришвартованого до причалу, під дією регулярних хвиль.....22

**МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ**

**А.А. Andrieiev, N.B. Andrieieva, O.I. Solomyentsev**

Optimization of Intercooling Parameters for Charged Air  
in Marine Diesel Engines.....37

**О.В. Кириллова, В.Ю. Кириллова**

Концептуальна модель розмежування технологічних  
і логістичних процесів у транспортній галузі  
на основі продуктоцентричного підходу.....47

**О.А. Куропятник**

Управління емісією оксидів сірки під час використання палива  
біологічного походження, яке становлять гідровані рослинні мастила.....67

**Р.О. Разінкін**

Діагностування технічного стану судових дизелів  
за аналізом моторної оливи.....82

**Д.О. Шалапко, О.І. Соломенцев, О.О. Кухаренко**

Використання гідроочищеної рослинної олії з добавкою водню  
у судових дизельних двигунах: сучасний стан і проблеми застосування.....94

**ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)**

**І.А. Вікович, А.Ф. Обшта, В.Е. Приходько**

Розрахунок інтегральних показників ефективності маршрутів  
вантажних перевезень у США.....108

**О.Л. Drozhzhyn, F.A. Volianskyi**

Sustainable development: a review of policies and practices  
of European intermodal companies.....122

**В.Ю.Торгашов, М.О. Баб'як**

Захист колектора тягових електричних двигунів електровоза  
від пошкодження дуговим розрядом.....136

C O N T E N T S

---

---

**ECONOMIC**

- O.V. Kopylova**  
Analysis of private investment in shipbuilding:  
world experience.....7

**INDUSTRIAL MECHANICAL ENGINEERING**

- N.I. Aleksandrovska, M.B. Kosoy, O.V. Demidiuk**  
Experimental study of the dynamics of a large-tonnage bulk carrier moored  
at a berth under the action of regular waves..... 22

**SEA AND INLAND WATER TRANSPORT**

- A.A. Andrieiev, N.B. Andrieieva, O.I. Solomyentsev**  
Optimization of Intercooling Parameters for Charged Air  
in Marine Diesel Engines..... 37

- O.V. Kyrillova, V.Yu. Kyrillova**  
Conceptual model for differentiating technological and logistics processes  
in the transport sector based on a product-centric approach.....47

- O.A. Kuropyatnyk**  
Maintaining the environmental friendliness of seagoing vessels  
when using catalytic reduction systems for marine diesel engines..... 67

- R.O. Razinkin**  
Diagnostics of the technical condition of marine diesel engines  
by analysis of engine oil..... 82

- D.O. Shalapko, O.I. Solomyentsev, O.O. Kukharenko**  
Use of hydro-refined vegetable oil with added hydrogen  
in marine diesel engines: current status and application problems ..... 94

**TRANSPORT TECHNOLOGIES (BY TYPE)**

- I.A. Vikovych, A.F. Obshta, V.E. Prykhodko**  
Calculation of Integral Efficiency Indicators for Freight Transportation Routes  
in the United States.....108

- O.L. Drozhzhyn, F.A. Volianskyi**  
Sustainable development: a review of policies and practices  
of European intermodal companies.....122

- V.Yu. Torhashov, M.O. Babyak**  
Protection of electric locomotive traction motor collector against damage  
by arc discharge.....136

## ЕКОНОМІКА

УДК 656.6:336.7

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2025.4-27.01>

### АНАЛІЗ ПРИВАТНИХ ІНВЕСТИЦІЙ У СУДНОБУДУВАННІ: СВІТОВИЙ ДОСВІД

**О.В. Копилова**

к.е.н., доцент, доцент кафедри «Економіка і фінанси»,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-9163-3369

#### *Анотація*

**Вступ.** Суднобудування відіграє важливу роль у багатьох суміжних галузях та національній економіці загалом. Ця галузь впливає на конкурентоздатність держави і економіко-політичне становище у світі. Стан суднобудівної галузі безпосередньо впливає на розвиток судноплавства, його забезпечення високотехнологічними та енергозберігаючими суднами. Попри наявність значної уваги науковців і практиків до проблем фінансування та розвитку судноплавства, низка аспектів залишається не досить чи фрагментарно дослідженою. **Мета.** Стаття присвячена визначенню тенденцій та проблем приватного інвестування у суднобудування на міжнародному рівні з акцентом на європейський досвід. **Результати.** Охарактеризовано сучасні потреби в інвестиціях суднобудівної галузі під впливом фінансово-економічних глобалізаційних викликів. Визначено сучасні напрями приватного інвестування у суднобудуванні. Проаналізовано наявні інструменти фінансування судноплавства та визначено найбільш ефективні та перспективні для використання. Сформульовано рекомендації щодо оптимальної стратегії залучення приватного капіталу до суднобудівної галузі. **Висновки.** Стабільно зростаючі обсяги світової морської торгівлі мають відповідно забезпечуватись зростанням світового флоту та його місткістю. Суднобудування має не тільки конкурувати за швидкість та безпеку транспортування вантажів, а й має відповідати низці міжнародних умов та стандартів щодо декарбонізації. Декарбонізація світового судноплавного флоту вимагає значних інвестиційних ресурсів. Інструменти сталого фінансування, включаючи зелене, синє та змішане фінансування, що поєднують пільгове та комерційне фінансування, відіграватимуть центральну роль у забезпеченні необхідних коштів. Запровадження правил Базеля II щодо вимог до капіталу значно збільшило вимоги до судноплавних компаній та витрати на фінансування довгострокових кредитних зобов'язань. Запропонований альтернативний підхід полягає у стимуляції небанківських джерел кредитування, які не підпадають під згадані вимоги до банківського капіталу. Таким чином, з'являються нестандартизовані продукти, які пропонуються в кожному окремому випадку, залежно від конкретних потреб та обставин кожного

клієнта. Однак інформація про спеціалізовані судноплавні продукти, що пропонуються приватними банками, є обмеженою. Відсутність прозорості ускладнює для судноплавних компаній повне розуміння своїх можливостей та прийняття обґрунтованих рішень. Таким чином, постає питання щодо стандартизації фінансових рішень для судноплавства, що базуються на приватному капіталі. Такі стандартизовані варіанти зможуть забезпечити ширший доступ до фінансування, знизити транзакційні витрати та спростити процес для багатьох судноплавних компаній.

**Ключові слова:** інвестиції, приватний капітал, судноплавство, суднобудування, декарбонізація, стратегія, морська торгівля, ринок цінних паперів.

## ANALYSIS OF PRIVATE INVESTMENT IN SHIPBUILDING: WORLD EXPERIENCE

**O.V. Kopylova**

Associated Professor, Department of Economics and Finance,  
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-9163-3369

### **Summary**

**Introduction.** Shipbuilding plays an important role in many related industries and the national economy as a whole. This industry affects the country competitiveness, the economic and political situation in the world. The state of the shipbuilding industry directly affects the development of shipping, its provision with high-tech and energy-saving vessels. Despite the significant attention of scientists and practitioners to the problems of financing and development of shipping, a number of aspects remain insufficiently or fragmentarily researched. **Purpose.** The article is devoted to identifying trends and problems of private investment in shipbuilding at the international level with an emphasis on European experience. **Results.** The current investment needs of the shipbuilding industry under the influence of financial and economic globalization challenges are characterized. Modern directions of private investment in shipbuilding are identified. Existing shipping financing instruments are analyzed and the most effective and promising ones are identified for use. Recommendations are formulated regarding the optimal strategy for attracting private capital to the shipbuilding industry. **Conclusions.** The steadily growing volume of world maritime trade must be matched by the growth of the world fleet and its capacity. Shipbuilding must not only compete for the speed and safety of cargo transportation, but also comply with a number of international conditions and standards for decarbonization. Decarbonization of the world shipping fleet requires significant investment resources. Sustainable financing instruments, including green, blue and blended finance, combining concessional and commercial financing, will play a central role in providing the necessary funds. The introduction of Basel II rules on capital requirements has significantly increased the requirements for shipping companies and the cost of financing long-term debt obligations. The proposed alternative approach is to stimulate non-bank sources of credit that are not subject to the aforementioned bank capital requirements. Thus, non-standardized products appear, which are offered on a case-by-case

*basis, depending on the specific needs and circumstances of each client. However, information on specialized shipping products offered by private banks is limited. The lack of transparency makes it difficult for shipping companies to fully understand their options and make informed decisions. Thus, the question arises of standardizing financial solutions for shipping based on private capital. Such standardized options could provide broader access to financing, reduce transaction costs, and simplify the process for many shipping companies.*

**Key words:** *investment, private capital, shipping, shipbuilding, decarbonization, strategy, maritime trade, securities market.*

**Вступ.** Суднобудування відіграє важливу роль у багатьох суміжних галузях та національній економіці загалом. Ця галузь впливає на конкурентоздатність держави і економіко-політичне становище у світі. Стан суднобудівної галузі відповідає рівню науково-технічного розвитку країни, бо кінцева продукція являє собою сукупність досягнень у багатьох виробничих сферах: металургії, машинобудуванні, електроніці та інноваціях. Крім того, стан суднобудівної галузі безпосередньо впливає на розвиток судноплавства, його забезпечення високотехнологічними та енергозберігаючими суднами. При цьому судноплавство є найголовнішим видом транспортування ресурсів та товарів в усьому світі та вважається фундаментом світової торгівлі. Одночасно з цим головною проблемою розвитку судноплавства виступають нестабільність та циклічність галузі.

**Постановка проблеми.** Після світової фінансової кризи 2007–2008 рр. значно змінилась структура фінансування суднобудівництва в усьому світі. Зростання регулятивних вимог у банківській сфері, що протягом багатьох десятиріч була традиційним джерелом фінансування судноплавства, призвело до значного дефіциту ресурсів для побудови нових комерційних суден. З іншого боку, активні процеси декарбонізації судноплавства вимагають значних обсягів капіталу для модернізації вже наявних суден, розробки та впровадження нових технологій. Зміна ландшафту світового суднобудування, зміщення центру до азійських країн, насамперед завдяки державним програмам підтримки та розвитку, поставила питання щодо місця європейського суднобудування та його майбутнього.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Значні наукові здобутки у сфері доступності банківського кредитування, що є однією з причин пошуку приватних інвестицій судноплавними компаніями, представлені у працях K.R. Lee та M.S. Pak [1]. W. Drobotz, L. Tegtmeier [2], A. Kuester Simic, P. Lauenstein та S. Prigge [3] проводять ретельний аналіз застосування, особливостей та невдач німецьких Kommanditgesellschaft (KG). Основні форми та ризики виходу компаній на зовнішні ринки охарактеризовано Р.Ю. Олексієнко, Д.Є. Проценко та К.О. Шпак [4]. Детальний аналіз економічних інструментів державної підтримки судноплавства в ЄС надано такими дослідниками, як: F. Hüttenhof, K. Jaehrling [5], О.В. Копилова [6]. Попри наявність значної уваги науковців і практиків до проблем фінансування та розвитку судноплавства, низка аспектів залишається не досить чи фрагментарно дослідженою. Зокрема, в українському науковому дискурсі найбільше уваги приділяється саме розвитку морського комплексу України у сукупності чи за регіонами, значний акцент робиться на побудову національних стратегій та імплементацію міжнародних програм розвитку. Більшість досліджень

мало приділяють уваги міжнародним проблемам фінансування судноплавства та суднобудування, сучасним методам їх вирішення, що є особливо актуальним в умовах інтеграції України до Європейського Союзу.

Формулювання цілей статті. Мета цього дослідження – проаналізувати сучасні світові інструменти приватного інвестування у суднобудування на міжнародному рівні з акцентом на європейський досвід, оцінити їх доступність та визначити найбільш прийнятні для розвитку судноплавства.

Для досягнення цієї мети сформульовано такі завдання:

- охарактеризувати сучасні потреби в інвестиціях суднобудівної галузі під впливом фінансово-економічних глобалізаційних викликів;
- визначити сучасні напрями приватного інвестування у суднобудуванні;
- проаналізувати наявні інструменти фінансування судноплавства та визначити найбільш ефективні та перспективні для використання;
- сформулювати рекомендації щодо оптимальної стратегії залучення приватного капіталу у суднобудування.

**Виклад основного матеріалу.** Останніми роками судноплавна галузь перебуває під зростаючим тиском щодо декарбонізації. Все більш суворі правила, пов'язані з викидами вуглецю, призвели до зростання інтересу галузі до інноваційних підходів до досягнення нульового рівня викидів. Підраховано, що на судноплавство припадає до 3 % світових викидів CO<sub>2</sub>, що перевищує показники авіації [7]. Прогнозують, що за умов відсутності контролю викиди можуть різко зрости до 2050 р. у відповідь на зростання обсягів міжнародної торгівлі. Екологізація глобальних ланцюгів постачання також критично залежить від морських викидів; без більш екологічних суден товари, які вони транспортують, теж не можуть бути екологічними. Таким чином, прийнято, що суднобудівна промисловість несе відповідальність за проектування та будівництво суден, які є цифровими, енергоефективними та здатними використовувати альтернативні види палива, щоб прокласти шлях до вуглецевого нейтрального майбутнього [7].

Таким чином, ми спостерігаємо за зростанням нової глобальної проблеми. Суднобудування, що має не тільки конкурувати за швидкість та безпеку транспортування вантажів, у сучасних умовах має відповідати низці міжнародних умов та стандартів щодо декарбонізації. Це відображено в таких стандартах, як: Індекс Енергоефективності для Існуючих Суден, Індикатор Інтенсивності Викидів Вуглецю, Індекс Енергоефективності Проектування, План Управління Енергоефективністю Судна тощо.

У 2025 р. світова морська торгівля продовжує перебувати у середовищі, яке характеризується волатильністю, нестабільними потоками та невизначеністю. Постійна геополітична напруженість та зміни в торговельній політиці змінили моделі судноплавства, внаслідок чого багато маршрутів було відкориговано з урахуванням дотримання безпеки. У 2024 та 2025 роках морська торгівля продовжувала коригуватися у відповідь на розвиток морських маршрутів та прискорення змін у світовому енергетичному та промисловому ландшафтах. Реструктуризація ланцюгів поставок, технологічна адаптація та підвищення стійкості змінюють структури морської торгівлі, при цьому зростає увага політики до енергетичної безпеки, сталого розвитку та фрагментації торгівлі.

Хоча світова морська торгівля у 2024 р. демонструвала стабільне зростання, що підтримувалося відновленням у ланцюгах поставок та покращенням показників

у деяких регіонах, що розвиваються, перспективи на 2025 рік передбачають більш помірне зростання або навіть стагнацію як загальних обсягів, так і тонно-миль. Згідно з прогнозами ЮНКТАД, очікується, що обсяг морської торгівлі зросте на 0,5 % у 2025 році, а контейнерна торгівля – на 1,4 %. У середньостроковій перспективі (2026–2030 рр.) прогнозується, що загальний обсяг морської торгівлі зростатиме у середньому на рік на рівні 2 %, тоді як контейнерна торгівля, за прогнозами, зросте на 2,3 % [8]. Обсяги морської торгівлі у 2024 р. досягли 12 720 мільйонів тонн, зросли на 2,2 % та перевищили середній показник за 2013–2023 рр. (1,8 %). Це свідчить про позитивну динаміку, проте темпи зростання відставали від середніх показників за 2003–2023 рр. (2,9 %), що вказує на довгострокове уповільнення зростання світових обсягів [9].

Стабільно зростаючі обсяги світової морської торгівлі мають відповідно забезпечуватись зростанням світового флоту та його місткістю. Станом на 1 січня 2025 р. світовий флот налічував близько 112 500 комерційних суден (включаючи вантажні та невантажні судна), кожне з яких має валову місткість щонайменше 100 тонн. Вантажопідйомність світового флоту за дедвейтом зросла на 3,4 % (рис. 1). Це відповідає темпам зростання 2023 р. Це було нижче середньорічного показника на 5,1 % за останні 20 років, але швидше, ніж зростання обсягу морської торгівлі. Світова місткість досягла близько 2,44 млрд тонн дедвейту.

Проаналізуємо тенденції зростання флоту за типами вантажних суден. За місткістю балкери залишаються найбільшим сегментом (42,5 %), на другій позиції нафтові танкери (27,5 %). Збільшення потужності залишилося нерівномірним: стрибок на 9,7 % для контейнеровозів та 7 % для газозовів. Зростання флоту газозовів відбувається за рахунок СПГ-перевізників та, зокрема, проекту Qatar Energy LNG. Місткість балкерів зросла на помірні 3 %, тоді як вантажні судна та нафтові танкери продемонстрували зростання на 1,9 % та 0,7 % відповідно. Відображаючи перехід до розумного та екологічного судноплавства та зміни цін

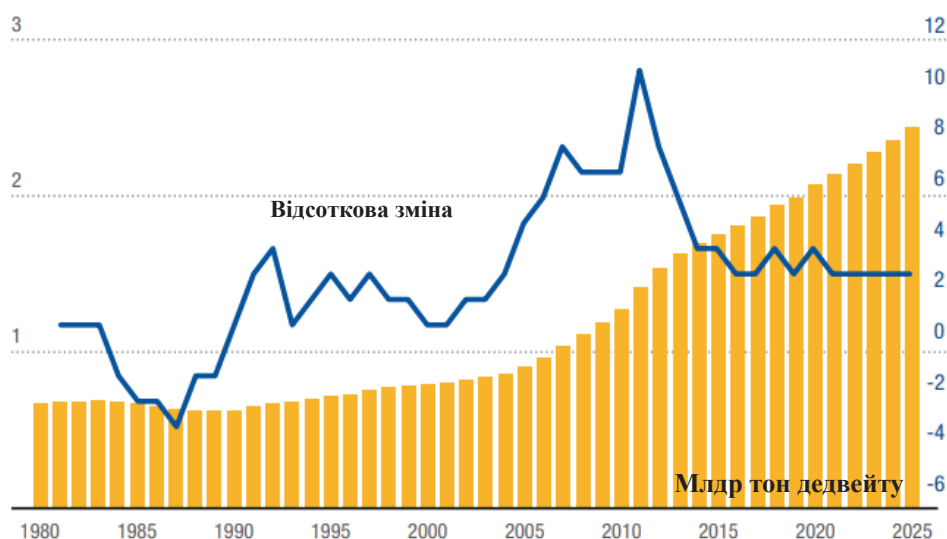


Рис. 1. Глобальна місткість флоту у 1980–2025 рр. [8]

на вживане вантажне судно, вартість світового флоту зросла до 1,52 трильйона доларів у червні 2025 р. [9].

Тоннаж нових суден, замовлених у 2024 р., збільшився на понад 50 % з 2023 р., тоді як світовий портфель замовлень зріс на 10,2 %. На початку 2024 р. частка портфеля замовлень у світовому активному флоті досягла 12,3 % порівняно з 11,1 % на початку 2023 р. До початку 2025 р. це співвідношення досягло 15 % і є відносно помірним за історичними стандартами, особливо порівняно з 52 % у 2009 р. та 19 % у 2014 та 2015 роках [9].

У 2024 р. до активного флоту було додано загалом 71,7 млн валових тонн. Кількість поставлених суден зросла на 8,8 % порівняно з 2023 р., а валовий тоннаж – майже на 10 % (порівняно з 15 % у 2023 р.). Щодо географії виконання замовлень, то азійські верфі традиційно домінують: китайські верфі доставили 54,6 % тоннажу, верфі в Японії – 12,6 %, верфі у Республіці Корея – 28 %, інші країни – 4,8 %. Контейнеровози домінували в ринку поставок, становлячи 41,3 % від загального валового тоннажу, поставленого у 2024 р. На балкери припадало 26,6 %, а на газовози – 12,2 %. Тоннаж побудованих нафтових танкерів становив 5,1 %; судна генеральних вантажів – лише 2,7 % [8].

Повертаючись до питання декарбонізації морського флоту, визначимо, наскільки відповідають новозбудовані судна новим стандартам і як це може вплинути на їхню вартість.

Викиди вуглецю від судноплавства зросли приблизно на 5 % у 2024 р. порівняно з 2023 р. (рис. 2) через подовження зміни маршрутів суден та збільшення швидкості. У першій половині 2025 р. спостерігалось скорочення викидів, імовірно, через зниження швидкості плавання, деякі експлуатаційні покращення та введення в експлуатацію нових суден. Водночас триває регуляторний тиск на декарбонізацію судноплавства. Комітет ІМО із захисту морського середовища схвалив нові середньострокові заходи щодо скорочення викидів парникових газів на своїй вісімдесят третій сесії у квітні 2025 р. Ці заходи поєднують обов'язкові обмеження паливомісткості та механізм ціноутворення на парникові гази. Вони набудуть чинності в березні 2027 р., з датою впровадження 1 січня 2028 р. Хоча ще зарано оцінювати результати, нові заходи, ймовірно, допоможуть збільшити постачання альтернативних видів палива та знизити ціни на них, що залишається ключовими перешкодами для їх впровадження. Доходи, які будуть зібрані, забезпечать винагороду суднам за зниження викидів парникових газів завдяки використанню джерел енергії з нульовими або близькими до нуля викидами.



Рис. 2. Щомісячні річні викиди вуглекислого газу у 2012–2025 рр. [8]

Декарбонізація світового судноплавного флоту вимагає значних інвестиційних ресурсів. Річна вартість будівництва та експлуатації суден для декарбонізації світового флоту оцінюється від 8 до 28 млрд доларів. Крім того, наземне виробництво та дистрибуція палива, а також відповідна портова інфраструктура (бункерування) можуть вимагати додаткових від 30 до 90 млрд доларів на рік. Інструменти сталого фінансування, включаючи зелене, синє та змішане фінансування, що поєднують пільгове та комерційне фінансування, відіграватимуть центральну роль у забезпеченні необхідних коштів [8].

Проаналізуємо сучасні напрями приватного (комерційного) інвестування у суднобудування. Слід відзначити, що структура джерел інвестування суднобудівної галузі значно змінилася за останні 100 років. На початку XX ст. фінансування переважно здійснювалося з таких джерел, як: власний капітал судновласників, державне фінансування та пільги, позики комерційних банків. Вже на початку XXI ст. відбулись значні зміни в бік альтернативних механізмів залучення фінансових ресурсів: ринки цінних паперів, венчурне фінансування, краудфандинг та платформи морських інвестицій, інші гібридні та інноваційні інструменти.

За останні два десятиліття спостерігається скорочення європейського банківського кредитування судноплавних компаній (див. рис. 3). На це дуже активно вплинуло впровадження Базельських стандартів, які застосовуються до всіх міжнародних банків з метою усунення недоліків кредитування, що призвели до глобальної фінансової кризи 2007–2008 рр. Відповідно, Базельські стандарти покликані забезпечити нормативну основу для зміцнення банківської системи: більш високі критерії співвідношення капіталу та інші нормативні вимоги центрального банку, включно з тими, що визначені ЄС, призвели до обмеження коштів, доступних для сектору судноплавства. Ця ситуація погіршилася прагненням самих банків зменшити наявний зворотний ризикований вплив судноплавства на них, внаслідок високої волатильності та невтішних прибутків морської галузі [11].

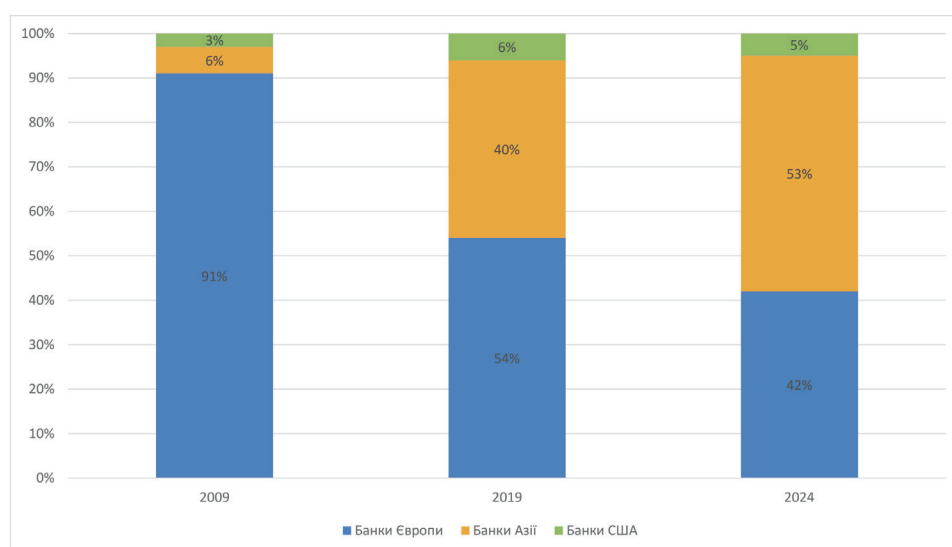


Рис. 3. Структура банківського кредитування суднобудування за регіонами (побудовано автором за даними [10])

Хоча суднобудування Китаю лише у 2000 р. зазнало великого поштовху у розвитку, вже за 15 років саме Китай випередив Японію та Південну Корею і став провідним у світі виробником суден за обсягами виробництва. Це також пояснює вражаюче зростання обсягів китайського банківського кредитування суднобудівництва: його частка зростає майже у 9 разів за 15 років (див. рис. 3). До кризи 2007–2008 рр. китайське кредитування судноплавства було зосереджене на внутрішньому ринку, підтримуючи китайські верфі та китайські судноплавні компанії. Зараз EximBank та China Development Bank посідають перше та друге місця, а Bank of China – четверте, у рейтингу світових портфелів судноплавства, домінуючи серед 40 найкращих банків, які досі працюють у цьому секторі.

Однак відповідно до даних Petrofin Bank Research банки все ще посідають головне місце у фінансуванні судноплавних компаній: індекс Petrofin показав слабе зростання з 62 пунктів у 2023 р. до 63 пунктів у 2024 р., а обсяг кредитування судноплавної галузі 40 провідними банками у 2024 р. збільшився на 2 % порівняно з попереднім роком [11]. Банківська галузь стикнулася з жорсткою конкуренцією з боку альтернативного фінансування, зокрема китайського лізингу, який пропонував більш гнучкі умови. Крім того, в очікуванні набрання чинності 1 січня 2025 р. правил Базеля IV були запроваджені суворіші вимоги до капіталу, що підвищило обізнаність банків щодо обмежень кредитування. Незважаючи на цей тиск, банки агресивно конкурували за утримання клієнтів, часто погоджуючись на нижчі маржі для забезпечення нового бізнесу.

Також останніми роками стає все більш важливим застосування Poseidon Principles – це новаторська структура, що узгоджує фінансування суден із кліматичними цілями. Фінансові установи, що дотримуються цих принципів, оцінюють вуглецевий слід суден перед наданням позик. Цей зсув заохочує судновласників інвестувати у флоти з низьким рівнем викидів, зменшуючи вплив на навколишнє середовище та забезпечуючи фінансування на вигідних умовах.

Приватні інвестиційні компанії відіграють дедалі більшу роль у фінансуванні суден, надаючи капітал для високоперспективних морських підприємств. Ці фірми інвестують у розширення флоту, екологічно чисті судна та передові технології судноплавства. На відміну від традиційних банківських позик, інвестори приватного капіталу отримують частки власності в компаніях, що дозволяє забезпечити довгострокове стратегічне зростання. Хоча ця модель фінансування забезпечує значний капітал без збільшення боргового тягаря, вона вимагає від судновласників розподілу прибутку та повноважень у прийнятті рішень. Інвестиції, підкріплені приватним капіталом, особливо поширені для суден з перевезення зрідженого природного газу, суден з підтримки морської вітрової енергетики та технологій автономного судноплавства.

Подібні причини стримують залучення капіталу на ринках акцій. До 2004 р. фондові ринки відігравали вкрай незначну роль у фінансуванні суднобудівництва: для інвестора акції судноплавних компаній не були особливо привабливим вибором для вкладення коштів через негативну репутацію та високу волатильність фрахтових ставок, а з іншого боку, тісні сімейні зв'язки всередині компаній та небажання судновласників розмивати контроль над бізнесом також гальмували вихід судноплавних компаній на ринок цінних паперів.



*Рис. 4. Фактори росту привабливості акцій судноплавних компаній на ринку цінних паперів (розроблено автором)*

Судноплавні компанії лише наприкінці 90-х рр. ХХ ст. повноцінно відкрили для себе переваги публічного лістингу на міжнародних фондових біржах. Хвиля IPO (Initial Public Offering – первинне публічне розміщення акцій) судноплавних компаній у 2000–2007 рр. значно підвищила привабливість судноплавних компаній, що котирувались на біржах. Це стало можливим в умовах довгострокового об’єднання чотирьох важливих факторів (див. рис. 4).

Стабільне зростання фрахтових ставок, що є фундаментом прибутку судноплавних компаній, було забезпечене своєю чергою зростанням найбільших економік світу – США та Китаю та відповідним зростанням попиту на морські перевезення. Разом із тим ринок цінних паперів, значно перегрітий зростанням американської економіки, зберігав бичачий тренд на іпотечні цінні папери, що своєю чергою підтримувало тренд акцій судноплавних компаній. Крім того, певний дефіцит на первинному ринку цінних паперів за умов наявності вільних інвестиційних ресурсів також допоміг набрати популярність акціям судноплавних компаній.

Вважається, що комбінація зазначених факторів призвела до унікального суперциклу зростання судноплавного сектору протягом 2002–2008 рр., що проявилось у високих доходах та зростанні грошових потоків [12].

Також на ринку цінних паперів зростає популярність залучення приватних інвестицій за допомогою випуску облігацій. Облігації зазвичай емітуються на досить великий термін (зазвичай 5–10 років) з фіксованою ставкою і без дострокового часткового погашення, що забезпечує високий рівень гнучкості для управління волатильними грошовими потоками. Однак більшість судноплавних компаній мають рейтинг нижче інвестиційного рівня і вони вимушені емітувати високоприбуткові облігації з високою маржею (до 6 %–7 % вище аналогічних ставок). До 2009 р. частка корпоративних облігацій у загальному обсязі приватного фінансування судноплавства становила лише 3,8 %, вже у 2013 р. вона зросла до 17,1 % завдяки скороченню традиційного банківського кредитування за аналогічний період з 82,1 % до 59,4 % [13].

За даними порталу Marine Money [14] за період з листопада 2024 р. по жовтень 2025 р. значно змінюються тенденції у структурі залучення приватного

фінансування судноплавства. За цей період стабільну динаміку зростання демонструють облігації на фоні стабільного зменшення обсягів кредитування. Лізинг – дуже популярна фінансова послуга у сфері суднобудування, несподівано скорочується: з 45,55 % на начало періоду до 12,45 % за весь рік (див. рис. 5). У сукупності залучення інвестицій на ринку цінних паперів (акції та облігації) за цей період сягнуло 32,19 %; порівняно – обсяг банківського кредитування становить лише 44,66 %.

Норвезький ринок облігацій вважається особливо сприятливим для судноплавних активів, зі значним обсягом пропозицій «зелених» облігацій: декарбонізація флоту розглядається судновласниками як пріоритет.

Боргове фінансування також включає використання лізингових схем, на додаток до кредитів та облігацій. Два найпоширеніші типи лізингових структур у судноплавстві – це операційна оренда та фінансова оренда. Операційна оренда використовується для найму суден у формі короткострокового або середньострокового бербоут-чартеру або тайм-чартеру. Після закінчення дії угоди орендар повертає судно орендодавцю. Фінансова оренда використовується для довгострокового фінансування судна, охоплює значну частину економічного життя судна та зазвичай повністю амортизується. Орендодавець, чия основна роль полягає у фінансуванні, має мало відношення до активу, крім володіння ним, і всі операційні обов'язки лягають на орендаря, який у разі дострокового розірвання має повністю компенсувати збитки орендодавця. Лізинг дуже активно використовували на початку та у середині 2000-х рр., потім його обсяги значно скоротились одночасно з обсягами банківського кредитування [15].

До світової фінансової кризи 2007–2008 рр. дуже значний вплив мали німецькі Kommanditgesellschaft (KG) та норвезькі Kommandittselskap (KS): 26 % світового тоннажу новобудов фінансувалося за їх схемами. Це товариство з обмеженою

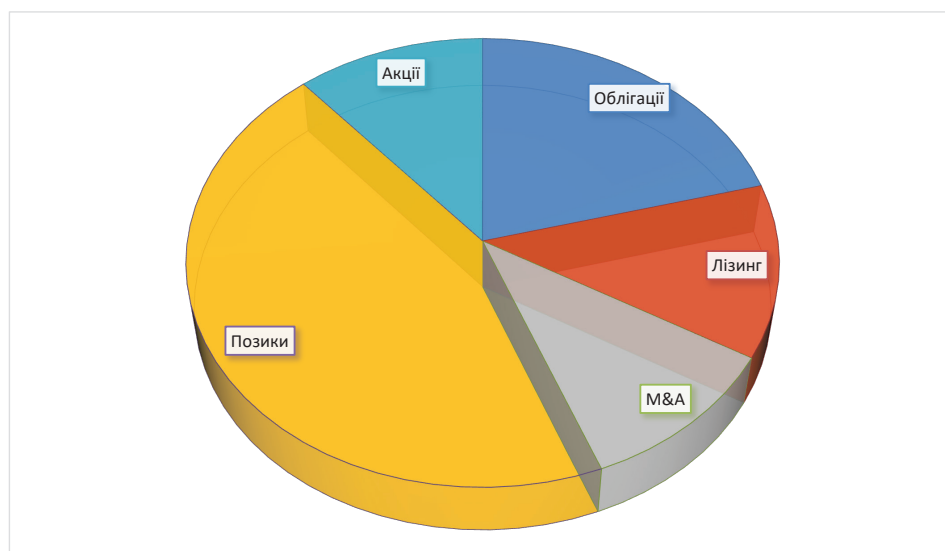


Рис. 5. Структура залучення приватного фінансування, листопад 2024–жовтень 2025 (побудовано автором за даними з [14])

відповідальністю, що об'єднує малих та середніх інвесторів у закритому непублічному фонді, що інвестує у судно. У 2004 р. створення «KG для одного судна» в поєднанні зі сприятливим податковим режимом призвело до напливу приватних інвесторів на цей ринок. Відмінною рисою цієї моделі є те, що інвестори можуть отримувати вигоду як від ефективності судноплавства, так і від фіксованих ставок податку. Оскільки податки стягуються відповідно до судноплавних потужностей, а не від фактично отриманих доходів, інвестори можуть очікувати позитивну віддачу від своїх інвестицій у судноплавство. Після кризи частка фінансування KG зменшилася до 2 % нових замовлень [16].

Група дослідників (W. Drobetz та ін.) [2] проаналізувала вибірку з 323 KG за період 1996–2007 рр. та виявила, що результати фондів KG більше залежать від цін на судна, ніж від ставок фрахту, що пояснюється специфічним / несистематичним ризиком, пов'язаним з цим класом активів. Таким чином, можна припустити, що розуміння динаміки ризику та дохідності фондів KG було складним завданням, що, своєю чергою, призвело до неточних оцінок аналітиків і, зрештою, до краху ринку. Більше того, дослідивши 341 німецький фонд KG, створений протягом 2007–2012 рр., K. Simic та ін. [3] виявили, що вторинний ринок KG демонструє високий рівень ефективності оцінки. Тим не менш, показано, що акції судноплавних фондів продаються нижче їхньої фундаментальної вартості, що додатково підтверджує припущення, що ринок фондів KG зазнає значної інформаційної асиметрії.

Норвезькі структури Kommanditselskap (KS) та Aksjeselskap (AS) відрізняються від німецьких KG, але мають і багато спільних рис. Вони дозволяють інституційним інвесторам та великим приватним інвесторам спільно інвестувати у судноплавні проекти через одноцільові структури. Ці угоди зазвичай включають можливість зворотної оренди, доступ до норвезького позабіржового (OTC – over-the-counter) ринку, сприятливий податковий режим згідно з режимом податку на тоннаж [17]. Норвезька модель робить акцент на проектному фінансуванні, приватному розміщенні та базі інвесторів, які добре знаються на морській справі. Найголовніше, що ці рамки дозволяють узгодити інтереси інвесторів з операційними показниками.

Побудова оптимальної стратегії залучення приватного капіталу у суднобудівництво є складним завданням та має враховувати як внутрішні, так і зовнішні чинники. Однак у сучасному нестабільному світі все більше уваги приділяється комбінуванню різноманітних інструментів задля зниження ризиків. Крім того, сучасні вимоги до автономії, альтернативних видів палива, технологій розумних портів значно підвищують кошторис нового судна, який усе складніше профінансувати з одного джерела.

Запровадження правил Базеля II щодо вимог до капіталу значно збільшило вимоги до судноплавних компаній та витрати на фінансування довгострокових кредитних зобов'язань. Запропонований альтернативний підхід полягає у стимуляції небанківських джерел кредитування, які не підпадають під згадані вимоги до банківського капіталу. Це може призвести до того, що небанківські кредитори візьмуть на себе роль, яку традиційно займали банки у секторі фінансування суден.

Приватні інвестори, особливо в ЄС, розробляють індивідуальні стратегії залучення капіталу для суднобудівництва. Таким чином, з'являються нестандартизовані

продукти, які пропонуються в кожному окремому випадку, залежно від конкретних потреб та обставин кожного клієнта.

З огляду на ці виклики деякі країни запропонували програми, що спрямовані на створення відтворюваних кредитів, спеціально розроблених для судноплавної галузі, що можуть підвищити доступність та прозорість фінансування [18]. Гнучкі кредитні схеми, які можна адаптувати до унікальних вимог кожного проекту, будуть розроблені провідними банками світу. Також вважається, що державне кредитування може зменшити ризики інвестицій на ранніх стадіях, особливо це стосується неперевіраних інноваційних технологій. Зниження фінансового ризику до рівня, за якого приватні кредитори матимуть більшу впевненість у інвестуванні, має вирішальне значення для подолання розриву в інноваціях. Ці відтворювані структури фондів матимуть спільні характеристики, забезпечуючи чіткі рекомендації та умови, що сприятимуть легшому доступу до фінансових ресурсів для нового будівництва та модернізації в морському секторі.

Таким чином, усе більше постає питання щодо стандартизації фінансових рішень для судноплавства, що базуються на приватному капіталі. Наявність стандартизованих варіантів може забезпечити ширший доступ до фінансування, знизити трансакційні витрати та спростити процес для багатьох судноплавних компаній. Крім того, існує очевидна потреба в більшій прозорості щодо доступності та умов фінансових продуктів, адаптованих до потреб судноплавної галузі. На відміну від більш стандартизованих банківських послуг, інформація про спеціалізовані судноплавні продукти, що пропонуються приватними банками, може бути обмеженою. Ця відсутність прозорості ускладнює для судноплавних компаній повне розуміння своїх можливостей та прийняття обґрунтованих рішень.

**Висновки.** Визначено, що стабільно зростаючі обсяги світової морської торгівлі мають відповідно забезпечуватись зростанням світового флоту та його місткістю. Одночасно суднобудування має відповідати низці міжнародних умов та стандартів щодо декарбонізації, яка вимагає значних додаткових інвестиційних ресурсів. Інструменти сталого фінансування, включаючи зелене, синє та змішане фінансування, що поєднують пільгове та комерційне фінансування, відіграватимуть центральну роль у забезпеченні необхідних коштів. У результаті світової фінансової кризи 2007–2008 рр. та запровадження нових вимог до банківського кредитування та капіталу значно зросли вимоги до судноплавних компаній та витрати на фінансування довгострокових кредитних зобов'язань.

Радикальне падіння обсягів банківського кредитування суднобудування призвело до пошуку альтернатив, які полягають у стимуляції саме небанківських джерел кредитування, які не підпадають під згадані вимоги до банківського капіталу. Таким чином, з'являються нестандартизовані продукти, які пропонуються в кожному окремому випадку, залежно від конкретних потреб та обставин кожного клієнта. Але інформація про спеціалізовані судноплавні продукти, що пропонуються приватними банками чи інвесторами, є обмеженою та асиметричною. Відсутність прозорості ускладнює для судноплавних компаній повне розуміння своїх можливостей та прийняття обґрунтованих рішень. Рішенням цієї проблеми має стати стандартизація фінансових рішень для судноплавства, що базуються на приватному капіталі. Такі стандартизовані фінансові продукти зможуть забезпечити

ширший доступ до фінансування, знизити трансакційні витрати та спростити процес залучення інвестиційного капіталу для багатьох судноплавних компаній.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Lee K.R., Pak M.S. Multi-criteria analysis of decision-making by international commercial banks for providing shipping loans. *Maritime Policy & Management*. 2018. № 45 (7). P. 850–862. URL: <https://2024.sci-hub.se/6723/acd08186b1fc27566865565acae1f5c/lee2018.pdf>
2. Drobetz W., Tegtmeier L. The development of a performance index for KG funds and a comparison with other shipping-related indices. *Maritime Economics & Logistics*. 2013. 15 (1). 32–71. URL: <https://link.springer.com/article/10.1057/mel.2012.21>
3. Simic K., Lauenstein P., Prigge S. Valuation Efficiency of Secondary Markets for Formerly Illiquid Assets: The Case of German KG Ship Funds. *Multinational Finance Journal*. 2016. 20 (2). P. 127–179.
4. Олексієнко Р.Ю., Проценко Д.С., Шпак К.О. Стратегії виходу організації на міжнародні ринки: перспективи управління ризиками. *Актуальні проблеми економіки*. 2024. № 4 (274). С. 96–104. URL: [https://eco-science.net/wp-content/uploads/2024/04/4.24.\\_topic\\_Roman-Oleksiienko-Dmytro-Protsenko-Kateryna-Shpakl-96-104.pdf](https://eco-science.net/wp-content/uploads/2024/04/4.24._topic_Roman-Oleksiienko-Dmytro-Protsenko-Kateryna-Shpakl-96-104.pdf)
5. Hüttenhof F., Jaehrling K. Country Report Germany, European shipbuilding in a globalised market: the transformation of the German shipbuilding industry: a transnationalised growth model under pressure. Report 2024.06, ETUI. 49 p.
6. Копилова О.В. Економічні інструменти державної підтримки судноплавства. *Актуальні питання економічних наук*. 2025. № 12. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15716826>.
7. OECD: Decarbonise the maritime sector to meet net-zero goals. URL: <https://www.oecd.org/en/topics/shipbuilding.html>
8. Review of maritime transport. UNCTAD. 2024. URL: [https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2025\\_en.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2025_en.pdf)
9. Clarksons Research. Shipping Intelligence Network: Timeseries and graphs. Fleet and supply. 2025. URL: <https://www.clarksons.net/n/#/sin/timeseries/browse>
10. The new era of Shipping Finance. URL: [https://www.bayes.citystgeorges.ac.uk/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0004/838615/Ioannis-Alexopoulos.pdf](https://www.bayes.citystgeorges.ac.uk/__data/assets/pdf_file/0004/838615/Ioannis-Alexopoulos.pdf)
11. Key Developments and Growth in Global Ship Finance. Petrofin Global Bank Research and Petrofin Index of Global Ship Finance end 2024. URL: <https://www.petrofin.gr/wp-content/uploads/2025/07/Petrofin-Global-Bank-Research-and-Petrofin-Index-of-Global-Ship-Finance-end-2024.pdf>
12. Shipping Finance and International Capital Markets. URL: <https://lawexplores.com/shipping-finance-and-international-capital-markets/>
13. Ship financing: pre 2008 to date. URL: <https://mycompassair.com/mycompassair-blog/hello-world/>

14. Marine Money. Deals at a glance. URL: <https://www.marinemoney.com/deals>
15. Копилова О.В. Зміни у глобальному фінансуванні судноплавства: причини та наслідки. *International Science Journal of Management. Economics & Finance*. 2024. Vol. 3. No. 6. Pp. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjmef.20240306.04>.
16. Mills S., Wardle M. Developments In Marine Finance. Busan finance center. 2024. DOI: 10.13140/RG.2.2.29451.05929.
17. William Dahmer. Financing the Future of Shipping. A Sustainable Investment Model for Hamburg. 2025. URL: [https://www.researchgate.net/publication/391711680\\_Financing\\_the\\_Future\\_of\\_Shipping\\_A\\_Sustainable\\_Investment\\_Model\\_for\\_Hamburg/citation/download?\\_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19](https://www.researchgate.net/publication/391711680_Financing_the_Future_of_Shipping_A_Sustainable_Investment_Model_for_Hamburg/citation/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19)
18. Summary report on recommendations for the DG MOVE study to assess the situation in terms of demand and supply of finance for the maritime sector and develop a living inventory. Publications Office of the European Union. 2024. URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2832/0277031>

#### REFERENCES

1. Lee, K.R., Pak, M.S. (2018). Multi-criteria analysis of decision-making by international commercial banks for providing shipping loans. *Maritime Policy & Management*. № 45 (7). P. 850–862. URL: <https://2024.sci-hub.se/6723/acd08186b1fc27566865565acae1f5c/lee2018.pdf>
2. Drobotz, W., Tegtmeier, L. (2013). The development of a performance index for KG funds and a comparison with other shipping-related indices. *Maritime Economics & Logistics*. 15 (1). 32–71. URL: <https://link.springer.com/article/10.1057/mel.2012.21>.
3. Simic, K., Lauenstein, P., Prigge, S. (2016). Valuation Efficiency of Secondary Markets for Formerly Illiquid Assets: The Case of German KG Ship Funds. *Multinational Finance Journal*. 20 (2). P. 127–179.
4. Oleksiienko, R. Iu., Protsenko, D. Ie., Shpak, K. O. (2024). Strategies for an organization's entry into international markets: perspectives on risk management [Stratehii vykhodu orhanizatsii na mizhnarodni rynky: perspektyvy upravlinnia ryzykamy]. *Current economic problems*. 4 (274). 96–104. URL: [https://eco-science.net/wp-content/uploads/2024/04/4.24.\\_topic\\_Roman-Oleksiienko-Dmytro-Protsenko-Kateryna-Shpak1-96-104.pdf](https://eco-science.net/wp-content/uploads/2024/04/4.24._topic_Roman-Oleksiienko-Dmytro-Protsenko-Kateryna-Shpak1-96-104.pdf) [in Ukrainian].
5. Hüttenhof, F., Jaehrling, K. (2024.06). Country Report Germany, European shipbuilding in a globalised market: the transformation of the German shipbuilding industry: a transnationalised growth model under pressure. Report, ETUI. 49 p.
6. Kopylova, O.V. (2025). Economic instruments of state support for shipping [Ekonomichni instrumenty derzhavnoyi pidtrymky sudnoplavstva]. *Current issues in economic sciences*. № 12. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15716826> [in Ukrainian].

7. OECD: Decarbonise the maritime sector to meet net-zero goals. URL: <https://www.oecd.org/en/topics/shipbuilding.html>
8. Review of maritime transport. *UNCTAD*. 2024. URL: [https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2025\\_en.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2025_en.pdf)
9. Clarksons Research. Shipping Intelligence Network: Timeseries and graphs. *Fleet and supply*. 2025. URL: <https://www.clarksons.net/n/#/sin/timeseries/browse>
10. The new era of Shipping Finance. URL: [https://www.bayes.citystgeorges.ac.uk/\\_data/assets/pdf\\_file/0004/838615/Ioannis-Alexopoulos.pdf](https://www.bayes.citystgeorges.ac.uk/_data/assets/pdf_file/0004/838615/Ioannis-Alexopoulos.pdf)
11. Key Developments and Growth in Global Ship Finance. Petrofin Global Bank Research and Petrofin Index of Global Ship Finance end 2024. URL: <https://www.petrofin.gr/wp-content/uploads/2025/07/Petrofin-Global-Bank-Research-and-Petrofin-Index-of-Global-Ship-Finance-end-2024.pdf>.
12. Shipping Finance and International Capital Markets. URL: <https://lawexplores.com/shipping-finance-and-international-capital-markets/>
13. Ship financing: pre 2008 to date. Available from: <https://mycompassair.com/mycompassair-blog/hello-world/>
14. Marine Money. Deals at a glance. URL: <https://www.marinemoney.com/deals>
15. Kopylova, O.V. (2024). Changes in Global Shipping Finance: Causes and Consequences [Zminy u hlobal'nomu finansuvanni sudnoplavstva: prychny ta naslidky]. *International Science Journal of Management. Economics & Finance*. Vol. 3. No. 6. Pp. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjmef.20240306.04> [in Ukrainian].
16. Mills, S., Wardle, M. (2024). Developments In Marine Finance. *Busan finance center*. DOI: 10.13140/RG.2.2.29451.05929.
17. William Dahmer. (2025). Financing the Future of Shipping. A Sustainable Investment Model for Hamburg. URL: [https://www.researchgate.net/publication/391711680\\_Financing\\_the\\_Future\\_of\\_Shipping\\_A\\_Sustainable\\_Investment\\_Model\\_for\\_Hamburg/citation/download?\\_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19](https://www.researchgate.net/publication/391711680_Financing_the_Future_of_Shipping_A_Sustainable_Investment_Model_for_Hamburg/citation/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19)
18. Summary report on recommendations for the DG MOVE study to assess the situation in terms of demand and supply of finance for the maritime sector and develop a living inventory. Publications Office of the European Union. 2024. URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2832/0277031>

Дата першого надходження статті до видання: 20.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.11.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті: 26.12.2025

## ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 629.5:504.5:51

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2025.4-27.02>

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ВЕЛИКОТОННАЖНОГО БАЛКЕРА, ПРИШВАРТОВАНОГО ДО ПРИЧАЛУ, ПІД ДІЄЮ РЕГУЛЯРНИХ ХВИЛЬ

Н.І. Александровська<sup>1</sup>, М.Б. Косой<sup>2</sup>, О.В. Демідюк<sup>3</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доцент, доцент кафедри «Суднобудування та судноремонту ім. Ю.Л. Воробйова»,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна  
ORCID ID: 0000-0001-6591-2068

<sup>2</sup>к.т.н., доцент кафедри «Суднобудування та судноремонту ім. Ю.Л. Воробйова»  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна  
ORCID ID: 0009-0008-9757-644X

<sup>3</sup>к.т.н., доцент, професор кафедри «Суднобудування та судноремонту  
ім. Ю.Л. Воробйова»  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна  
ORCID ID: 0009-0002-1450-4077

#### Анотація

**Вступ.** Сучасний розвиток портової інфраструктури супроводжується будівництвом причальних споруд у недостатньо захищених акваторіях. За таких умов хвильове збурення може спричинити значні переміщення пришвартованих суден, що ускладнює вантажні операції та підвищує ризик пошкодження судна і причалу. Особливо небезпечними є регулярні хвилі, які можуть викликати резонансні коливання. Тому актуальним є експериментальне дослідження динаміки великотоннажних суден у реальних умовах експлуатації. **Мета.** Метою роботи є експериментальне визначення характеристик поступальних і кутових переміщень великотоннажного балкера, пришвартованого до причалу, під дією регулярного хвилювання в умовах мілководдя. Додатковою метою є верифікація аналітичної моделі руху судна та оцінка можливості застосування спрощених інженерних критеріїв для перевірки допустимості виконання вантажних операцій. **Результати.** Дослідження виконано в дослідному басейні з використанням фізичної моделі, побудованої за критерієм подібності Фруда. Розглянуто два стани навантаження – у повному вантажу та з 50 % вантажу та повними запасами для обох випадків. Для вимірювання рухів застосовано акселерометри та інклінометри. Обробку експериментальних даних проведено методом швидкого перетворення Фур'є. Встановлено, що при частковому завантаженні амплітуди вертикальних і повздовжніх коливань зростають, а періоди руху збільшуються. При повному завантаженні коливання зменшуються за рахунок більшої інерції судна. Поперечні та курсові переміщення залишаються незначними. Отримано задовільну узгодженість між експериментальними та розрахунковими даними. **Висновки.** У результаті дослідження підтверджено

суттєвий вплив умов завантаження на динаміку пришвартованого судна. Показано, що фізичне моделювання є ефективним засобом оцінки безпеки стоянки суден у складних гідрометеорологічних умовах. Запропонований підхід дозволяє обґрунтувати режими експлуатації причалів і вибір схем швартування без виконання складних чисельних розрахунків. Отримані результати можуть бути використані в практиці проектування та експлуатації портів споруд.

**Ключові слова:** пришвартоване судно; динаміка судна; регулярне хвилювання; фізичне моделювання; експериментальні дослідження; амплітуди коливань; швартовна система; причальні відбійники; гідрометеорологічні умови; безпека портів операцій.

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE DYNAMICS OF A LARGE-TONNAGE BULK CARRIER MOORED AT A BERTH UNDER THE ACTION OF REGULAR WAVES

N.I. Aleksandrovska<sup>1</sup>, M.B. Kosoy<sup>2</sup>, O.V. Demidiuk<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department “Shipbuilding and Ship Repair named after Yu.L. Vorobyov”,  
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine  
ORCID ID: 0000-0001-6591-2068

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor of the Department “Shipbuilding and Ship Repair named after Yu.L. Vorobyov”,  
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine  
ORCID ID: 0009-0008-9757-644X

<sup>3</sup>PhD, Associate Professor, Professor of the Department “Shipbuilding and Ship Repair named after Yu.L. Vorobyov”,  
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine  
ORCID ID: 0009-0002-1450-4077

### Summary

**Introduction.** The development of modern port infrastructure increasingly involves the construction of berthing facilities in insufficiently protected water areas. Under such conditions, wave-induced motions of moored vessels may significantly affect the safety and efficiency of cargo-handling operations and increase the risk of damage to both ships and quay structures. Regular waves are of particular concern, as they can cause pronounced oscillatory responses and resonance effects, especially in shallow water conditions. Therefore, experimental investigation of moored ship dynamics remains an important engineering task. **Purpose.** The purpose of this study is the experimental determination of linear and angular motion characteristics of a large-tonnage bulk carrier moored at a quay under regular wave action in shallow water. An additional objective is the validation of an analytical ship motion model and the assessment of simplified engineering criteria for evaluating the admissibility of vessel motions during port operations. **Results.** The study was carried out in an experimental basin using a physical ship model designed according to the Froude similarity criterion. Two load conditions were considered – at full load and with 50 % load and full reserves for both cases. Ship motions were measured using accelerometers and inclinometers installed near the model’s center of gravity. Experimental data were processed using fast Fourier transform techniques. The results show that partial loading leads to increased amplitudes

*of vertical and longitudinal motions and longer oscillation periods. In contrast, full loading reduces motion amplitudes due to higher inertial properties. Transverse and yaw motions remained negligible. A satisfactory agreement between experimental results and analytical predictions was obtained. **Conclusions.** The study confirms the significant influence of loading condition on the dynamic behavior of a moored vessel. Physical modeling has proven to be an effective tool for assessing the safety of ship berthing under regular wave conditions. The proposed approach can be applied in port design and operation practice to justify allowable operating conditions and mooring arrangements without performing complex numerical simulations.*

**Key words:** *moored vessel; ship dynamics; regular waves; physical modeling; experimental research; motion amplitudes; mooring system; quay fenders; hydrometeorological conditions; port operation safety.*

**Вступ.** Розширення портової інфраструктури дозволяє суттєво підвищити пропускну спроможність портів. Часто нові причальні споруди розташовуються в недостатньо захищених від дії вітру і хвиль місцях акваторії порту. Під час проектування причальних споруд у відкритих або недостатньо захищених акваторіях особливого значення набуває задача дослідження поведінки судна, пришвартованого біля причалу, під дією вітру та хвилювання. Вирішення цієї задачі необхідне для забезпечення відповідності проектних рішень чинним нормативним документам, зокрема PIANC WG 115 (Standard for the Design of Fenders) [1] та РД 31.33.10-87 [2]. Вітрові та хвильові навантаження можуть спричинити переміщення судна, що ускладнюють виконання вантажно-розвантажувальних робіт і підвищують ризик пошкодження як корпусу судна, так і причальних конструкцій. Це, у свою чергу, негативно впливає на безпеку та ефективність портових операцій і зумовлює необхідність розроблення обґрунтованих режимів стоянки суден. Науково обґрунтований підхід до аналізу поведінки ошвартованого судна має базуватися на кількісному вивченні процесів його руху під впливом зовнішніх збурень. Особливу увагу при цьому слід приділяти впливу морського хвилювання, що надходить з відкритої акваторії, а також хвиль, утворених рухом великотоннажних суден у межах порту.

**Постановка проблеми.** Поведінка пришвартованого судна біля причалу визначається складною взаємодією гідродинамічних, конструктивних та експлуатаційних факторів. На судно впливають хвилі, течія, вітер, а також коливання рівня води і суднової хвилі від суден. Ці дії передаються через швартовну систему та кранці на корпус судна та причальну інфраструктуру, формуючи динамічні навантаження, які можуть суттєво перевищувати статичні значення. У загальному випадку дослідження руху судна біля причалу зводиться до розв'язання сполученої задачі взаємодії судна, причалу та навколишнього середовища, яка включає опис хвильового й вітрового полів, рух судна з шістьма ступенями свободи та реакцію швартовних канатів, що, як правило, має нелінійний характер. З огляду на складність такої задачі, її розв'язання здебільшого здійснюється чисельними методами. Незважаючи на розвиток аналітичних та чисельних методів моделювання, експериментальні дослідження залишаються основним джерелом достовірної інформації про реальні характеристики руху суден та навантаження у швартовних системах. Саме експеримент дозволяє виявити нелінійні ефекти, резонансні явища та масштабні особливості, які важко коректно врахувати у теоретичних моделях. У зв'язку

з цим експериментальні програми високого рівня відіграють ключову роль у розвитку сучасної теорії швартування.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Одним із основних напрямків експериментальних досліджень є фізичні модельні випробування у хвильових басейнах. Найбільші лабораторії, такі як MARIN [3] і Deltares [4] протягом десятиліть виконують масштабні експериментальні програми, спрямовані на вивчення поведінки пришвартованих суден. Під час таких випробувань вимірюються всі шість ступенів свободи руху судна, зусилля у швартовних лініях та сили взаємодії з відбійниками. Масштабування експериментів здійснюється на основі критерію Фруда, що забезпечує коректну передачу гравітаційних та інерційних ефектів. При цьому використовуються спеціальні елементи, що імітують пружність та демпфування швартів та кранців. Однак основним обмеженням залишається масштабний ефект, особливо при моделюванні в'язких та контактних явищ.

Результати експериментальних досліджень використовують також для верифікації програмних комплексів динамічного аналізу швартування. Класичним прикладом є робота [5], де результати чисельного моделювання порівнювалися з даними фізичних експериментів. У рамках цієї програми було розглянуто кілька принципово різних конфігурацій: LNG-танкер біля відкритого причалу, судно біля гравітаційної платформи, вплив хвиль суден, що проходять, і тандемне швартування. До кожного випадку проводилися незалежні фізичні випробування, після чого виконувалось зіставлення з результатами чисельного моделювання. Показано, що сучасні динамічні моделі здатні досить точно відтворювати спектри коливань та пікові навантаження, якщо коректно задані гідродинамічні коефіцієнти та характеристики швартовної системи.

В роботі [6] досліджується розвиток моделювання руху пришвартованих суден, порівнюючи тривимірну чисельну модель з експериментальними даними, отриманими в лабораторії. Це також натурно орієнтоване дослідження, в якому дані фізичного експерименту використовуються для перевірки та покращення чисельної моделі.

В роботі [7] приведені результати фізичного експерименту на моделі судна, ошвартованій коло причальній стінці. Основною метою дослідження було порівняння «вільної» схеми швартування та схеми з попередньо натягнутими швартовними лініями з точки зору амплітуд коливань судна, зусиль у швартовах, стійкості положення біля причалу, ефективності демпфування. У ході експериментів варіювалися параметри хвилювання, жорсткість ліній та рівень попереднього натягу. Отримані дані використовувалися для оцінки можливості застосування tension mooring як засобу зниження динамічних навантажень та підвищення експлуатаційної стійкості суден у портах. Експерименти показали, що застосування натягнутих швартовів призводить до помітного зменшення амплітуд коливань у поперечно-горизонтальному напрямку в порівнянні з традиційною схемою. Використання tension mooring може бути ефективним рішенням для відкритих причалів, зон із регулярним хвилюванням, тимчасових стоянок. Однак метод вимагає ретельного інженерного розрахунку та посиленої швартовної інфраструктури.

На відміну від лабораторних випробувань, натурні експерименти проводяться безпосередньо в портах, що діють. Вони ґрунтуються на довготривалих вимірах руху суден та навантажень на швартовну систему з використанням

GPS, інерційних датчиків, тензодатчиків та хвилемірів. Найбільш відомі в цьому напрямі дослідження японського портового інституту [8], в рамках яких протягом місяців і років фіксувалися реальні коливання суден в умовах довготривалого хвилювання і сейшей. Такі дані мають унікальну цінність, оскільки відбивають реальні експлуатаційні умови. Натурні виміри показали, що навіть за відносно малої амплітуди хвиль у портах можуть бути значні горизонтальні коливання суден за рахунок резонансного збудження. Ці ефекти не враховуються у спрощених розрахункових методах, що призводить до помилок у проектуванні.

Найвищу достовірність результатів забезпечує комбінований підхід, що поєднує лабораторні випробування, натурні виміри та чисельне моделювання. Цей метод дозволяє враховувати як локальні особливості акваторії, так і індивідуальні характеристики суден. Він широко застосовується у міжнародних проектах під егідою PIANC [9] та OCIMF [10].

Аналіз найбільших експериментальних програм дозволяє виділити низку загальних закономірностей: рухи пришвартованих судів мають суттєво нелінійний характер і часто визначаються резонансними ефектами; пікові навантаження у швартовних лініях можуть значно перевищувати середні значення та повинні враховуватися під час проектування; характеристики кранців і швартовів надають суттєвий вплив на динамічний відгук системи; квазістатичні методи розрахунку руху пришвартованого судна прийнятні лише обмеженому діапазоні умов

**Формулювання цілей статті.** Ця стаття з'явилася по результатам експерименту, проведеного авторами в межах наукового-дослідницької роботи ОНМУ на замовлення компанії «ТЕХАГРО», що спеціалізується на проектуванні причалів. Один з проектів проєктувальника розташований в порту «Південний», в недостатньо захищеній зоні портової акваторії. Головне питання, що мало з'ясувати дослідження, стосувалося питань безпеки проведення вантажних робіт та експлуатації причального обладнання. Критичними для цих питань є визначення амплітуд вертикального переміщення та куту диференту, які в силу специфіки традиційних схем швартування, не мають компенсуючих моментів з боку швартовної системи.

У аналітичній частині наукового-дослідницької роботи було розроблено інженерну методику оцінки критичних амплітуд руху судна [11]. Метою експериментальної роботи було визначення амплітуд поступальних та кутових переміщень судна, ошвартованого до причалу в умовах мілководдя під дією регулярного хвилювання, що відповідало метеорологічним умовам завдання, та верифікація аналітичного методу оцінки амплітуд.

**Виклад основного матеріалу.** Як вище було відмічено, експериментальний метод дослідження поведінки пришвартованого судна лишається найбільш достовірним методом, особливо для проєктувальних робіт. Тому отримання характеристик його руху виконано із застосуванням фізичного моделювання в дослідному басейні ОНМУ.

**Об'єктом дослідження** є поведінка системи судно-причал в умовах регулярного хвилювання. Обраний «умовний» балкер з типовими для суден такого типу обводами. Розглянуті два варіанти навантаження із 100 % вантажу та 50 % вантажу при 100 % запасів для обох випадків.

Характеристики судна: довжина – 240 м; ширина – 38 м; дедвейт – 80 тис. т; осадка у повному завантаженні – 15 м наполовину завантаженого – 10,5 м;

водотоннажність вагова у повному вантажу – 126 198 т, наполовину завантаженого – 84 184 т; густина води  $\rho = 1,024 \text{ т/м}^3$ .

Характеристика причалу: довжина – 270 м; ширина – 16,5 м; глибина – 17 м; відбійники SPC900G1.1, зосереджена сила реакції – 166 кН., поглинання енергії – 44кНм, максимальна деформація – 74 %.

Характеристика хвилювання: Штормова, висота – 3,5 м; довжина 55 м; період – 5 с; напрямок – уздовж причалу. Форма корпусу показана на рисунку 1.

**Предметом дослідження** є частоти, амплітуди поступального та кутового переміщення пришвартованого судна на регулярному хвилюванні.

**Методи дослідження.** При плануванні експериментальних досліджень враховувалися деякі обмеження: моделювалася лише хвилева дія на причал та судно (в басейні ОНМУ не існує можливостей для створення вітрових навантажень); існуюче в басейні ОНМУ обладнання може генерувати лише регулярне хвилювання. Це з одного боку не відповідає дійсній картині хвилювання, а з другого призводить до максимального впливу на судно при однаковій інтенсивності регулярних і нерегулярних хвиль; розглядався випадок руху регулярних хвиль в ніс та в корму пришвартованого судна, так як причал розташований вздовж входу в акваторію порту; враховуючи малий масштаб моделі на слабке хвильове навантаження, в лабораторії ОНМУ немає можливості моделювати пружно роботу швартовних тросів та відбійників за відсутності відповідних тонких вимірювальних пристроїв. Тому у роботі прийнята статична модель роботи швартовних приладів, а троси моделювалися капроновими нитками. З обзору досліджень ясно, що динамічні ефекти швартовних тросів проявляються

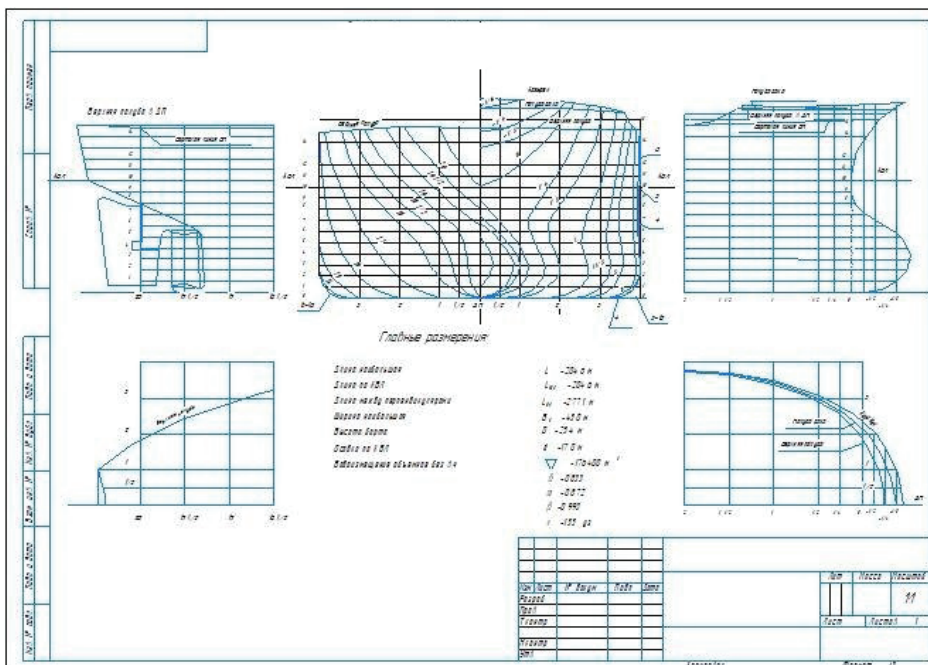


Рис. 1. Теоретичне креслення балкера

на довгоперіодичних хвилях, що не відповідає завданню експерименту, і можна користуватися лінійним наближенням.

Процедура обрання масштабу виконана із урахуванням розмірів басейну та впливу його границь на показники хвилювання. Обраний масштаб моделі 1:131. Характеристики моделі: довжина між перпендикулярами  $L_{\text{пн}} = 2,061$  м; ширина  $B = 0,29$  м, осадка судна у повному вантажі  $d = 0,115$  м; у випадку 50 % завантаження  $d = 0,08$  м; водотоннажність вагова у вантажі  $D = 54,8$  кг, у випадку 50 % завантаження  $D = 38,3$  кг, густина води  $\rho = 1,0$  т/м<sup>3</sup>.

Характеристики розрахункової хвилі обрані на основі даних замовника та [2] про типові хвилі в прибережній зоні району північно-західної частини акваторії Чорного моря. Оскільки глибина акваторії біля причалу, що розглядається становить  $H = 17$  м, для визначення параметрів хвилі, зважаючи на характеристики судна, застосовані вирази для мілководдя. Висота хвилі дорівнює 3,5 м. Довжина хвилі спостерігаєма  $\lambda = 55$  м. Відповідно крутизна хвилі складає  $\bar{h} = h/\lambda = 1/15,71$ . Характеристики модельної хвилі: довжина  $\lambda = 0,42$  м, хвильове число  $k = 14,97\text{м}^{-1}$ , частота  $\sigma = 11,87\text{с}^{-1}$ , період  $\tau = 0,529$  с.

Модель балкери виконана в дослідному басейні ОНМУ та пройшла динамічне тарювання в процесі якого визначені значення поздовжнього та поперечного  $\rho^x$  і  $\rho^y$  радіусів інерції мас для двох розглянутих випадків навантаження. Визначення радіусів інерції мас судна виконано шляхом визначення періоду вільних коливань судна в повітрі.

Експериментальна установка. Для проведення експериментальних досліджень на мілководді в дослідному басейні ОНМУ передбачена можливість встановлення подвійного дна. Регулярні прогресивні хвилі створюються за допомогою пластинчастого хвилепродуктора, який приводиться в дію за допомогою електродвигуна потужністю 3 кВт. Електродвигун оснащений блоком частотного керування Schneider Electric, що дозволяє регулювати частоту генерації хвиль з точністю до 0,1 Гц. Рисунок 2 демонструє розташування судна і причалу відповідно руху хвиль.

**Підбір висоти хвилі.**  $h_{\text{ф}} = f(\sigma_{\text{м}}, r_{\text{вп}}, K_{\text{вп}})$  – фактична висота хвилі, яка підбирається в процесі підготовки до експерименту;  $|h_{\text{ф}} - h_{\text{м}}| \leq \varepsilon$ , де  $\varepsilon = 2$  мм із урахуванням особливостей пластинчастого хвилепродуктора і нерівномірності генерації регулярного хвилювання;  $K_{\text{вп}}$  – коефіцієнт редуктора хвилепродуктору;  $r_{\text{вп}}$  – радіус встановлення коромисла хвилепродуктору. Підбір  $h_{\text{ф}}$  здійснений за допомогою датчика висоти хвилі струнного типу. Вказаний датчик цифрового

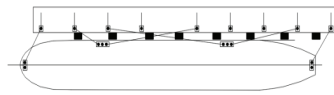
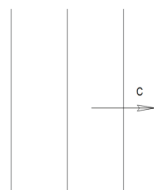


Рис. 2. Схема швартування судна до причалу

типу передає сигнал на аналогово-цифровий перетворювач / регістратор LCard L-14140 і далі на персональний комп'ютер для формування файлу даних. Висота хвилі була підібрана при фіксованих характеристиках хвилювання до початку експериментальних досліджень. При цьому датчик хвилі був розташований в місті розміщення моделі в середній частині басейну. Додатковий контроль висоти хвилі здійснювався візуально за допомогою спеціальної мірної шкали, розташованої на борту басейна та цифрової фотокамери Nikon 5200.

**Підготовка до проведення випробувань** проходила у декілька етапів: підбір характеристик регулярного хвилювання; виконання дослідів кренування для двох випадків завантаження; підбір радіусів інерції для двох випадків завантаження; встановлення моделі і закріплення її до причалу; проведення експерименту з фіксацією діючих прискорень та нахилів в процесі руху судна. Проведення відеофіксації поведінки моделі на хвилюванні. Для апаратного контролю випробувань використані цифрові пристрої – акселерометр та інклінограф, які встановлювалися на модель судна в районі центру ваги.

Інклінограф в одному компактному пристрої поєднує акселерометр 3-осьовий, GY-291 ADXL345, бібліотеку SparkFun\_ADXL345; інклінометр ADuC845/ADXL103; wi-fi сервер для безпроводної передачі даних; джерело постійного струму (аккумулятор 18860).

За результатами випробувань було отримано данні акселерометра по прискоренням поступальних рухів судна для випадків 100 % та 50 % навантаження моделі. За цими даними перераховуються власно процеси поступальних переміщень за наступною схемою. Прискорення коливального процесу та власно процес пов'язані відношенням  $\ddot{x}_i = -(2\pi f_i)^2 x_i$ , тому амплітуда процесу дорівнює амплітуді прискорення, поділеної на  $-(2\pi f_i)^2$ . Перерахунок модельних значень на натурні здійснюється порівнянням безрозмірних виразів прискорень для природи та моделі:  $\frac{A_n}{h_n} (2\pi\sigma_n)^2 \cos(2\pi\tilde{t}) = \frac{A_m}{h_m} (2\pi\sigma_m)^2 \cos(2\pi\tilde{t})$ .

**Обробка даних** здійснювалася наступним образом: за даними акселерометра відносно прискорень моделі за формулою  $A_n = \frac{h_n}{h_m} \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_n} \right)^2 A_m$  було перераховано

значення прискорення для природи; методом швидкого перетворення Фур'є отримано їх амплітудні спектри  $A_i(f)$ ; аналітичний вираз прискорення представлений сумою  $n$  осциляцій з істотними значеннями частот  $f_i^j$  з піковими амплітудами  $A_i^j$  у вигляді  $\ddot{x}_i = \sum_j^n A_i^j \cos(2\pi f_i^j t)$ ; аналітичний вираз власно переміщень отримано у вигляді суми  $x_i = \sum_j^n \frac{A_i^j}{(2\pi f_i^j)^2} \cos(2\pi f_i^j t)$ . Конструктивною особливістю функ-

ціонування інклінометра є високою чутливістю до високочастотних вібрацій, які неможливо виключити в таких грубих випробуваннях, де очікуванні результати мають порядок  $10^{-1}$  м та  $10^{-1}$  с. Тому данні по кутових переміщеннях було відфільтровано методом швидкого перетворення Фур'є. На рис. 3–5 представлені графіки перерахованих на натурне судно результатів модельних замірів амплітуд та кутів нахилу.

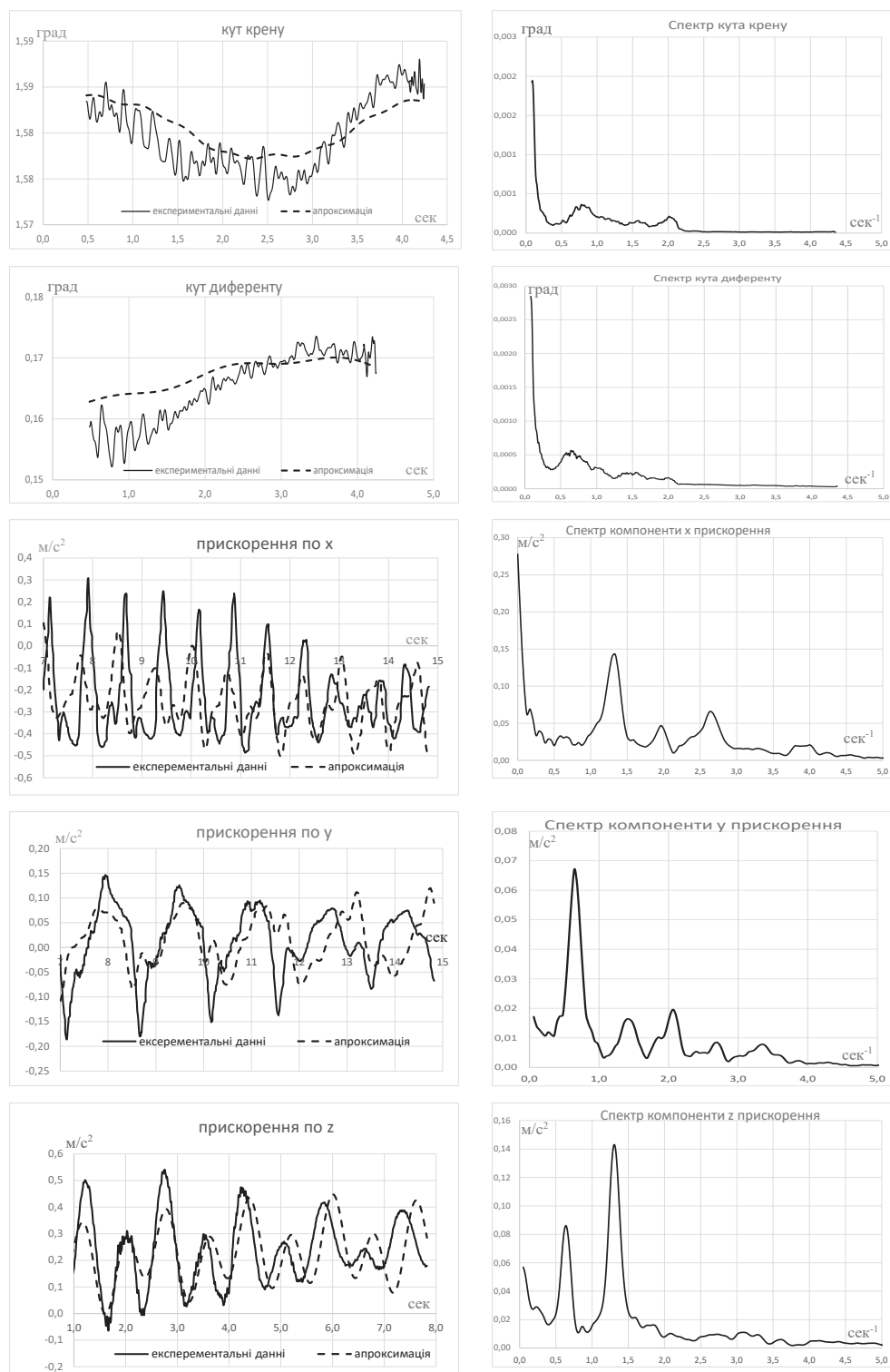


Рис. 3. Данні по поступовим прискоренням та кутовим переміщенням судна при 50 % навантаження

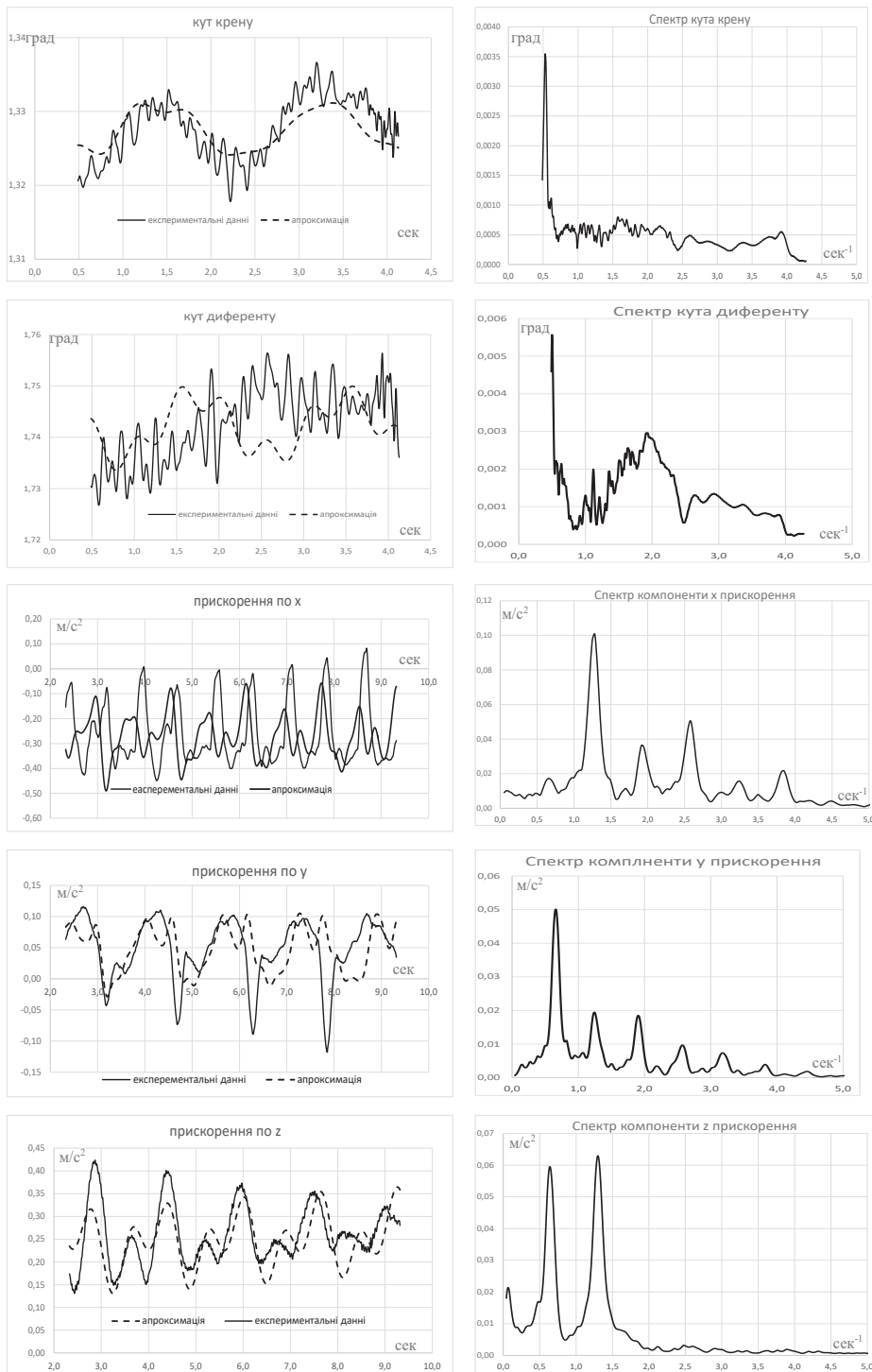


Рис. 4. Данні по поступовим прискоренням та кутовим переміщенням судна при 100 % навантаження

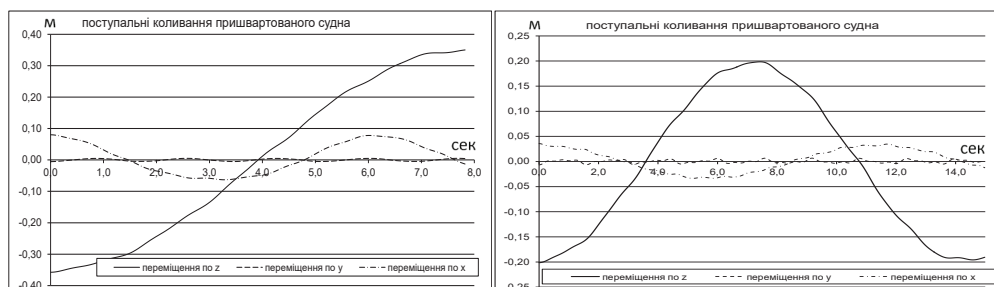


Рис. 5. Розраховані поступові переміщення відповідним експериментальним прискоренням судна: а) при 50 % навантаження; б) при 100 % навантаження

З графіків рис. 5 видно, що при 50 % навантаженні судно буде здійснювати вертикальні переміщення з амплітудою до 0,4 м і періодичністю 14–15 с, та повздовжні коливання з амплітудою до 0,1 м з періодичністю 6сек. При 100 % навантаження судно буде здійснювати вертикальні коливання з амплітудою 0,2 м з періодичністю теж 14 с. Повздовжні коливання зменшали амплітуду до 0,05 м, а період збільшився майже вдвічі – до 12 с. Така зміна характеристик цілком зрозуміла, бо збільшилася інерція судна. Майже відсутнє коливання в поперечному напрямку та кути рискання в обох випадках. Це пояснюється відсутністю моделювання динамічної роботи швартовних тросів, де враховується фактор часу їх деформації. Але, як вже було сказано вище, це моделювання потрібне у випадку довгих хвиль, коли зміщення значне та розтягування тросів перевищує межі лінійного закону їх пружної деформації. В даній роботі зусилля, що виникають у тросах, пропорційні їх деформації.

Інклінометр зафіксував стаціонарні кути крену та диференту, отримані моделлю судна в наслідок причалювання. Для випадку 50 % навантаження стаціонарний кут крену дорівнює 1,58°, а кут диференту – 0,16°. Для випадку 100 % навантаження стаціонарний кут крену дорівнює 1,325°, а кут диференту – 1,745°. Бортова хитавиця в обох випадках майже відсутня, що обумовлено напрямком розповсюдження хвиль в розріз носової частини моделі. Кілева хитавиця майже відсутня через швартовну схему з відсутніми повздовжніми тросами і короткими притискними, майже перпендикулярними до корпусу моделі.

Данні експерименту дуже добре корелюють зі значеннями відповідних величин, що були розраховані аналітичним методом з системи лінійних рівнянь руху судна. В таблиці 1 вони приведені для порівняння.

Також цілком виконуються нерівності  $\sum_{l=1}^6 (|f_{kl}^c(\bar{l}_i)| - |a_{kl}|) + |f_l^0(\bar{l}_i)| - k(A) \frac{|b_l|}{\varepsilon_l} \leq 0, k = 1, 6$ , що втілюють метод перевірки відповідності рухів судна нормативним обмеженням порткових служб без розв'язання повної системи диференціальних рівнянь. Тут лише треба нагадати, що кожна з нерівностей є оцінкою норми строки матриці динамічної системи «судно-швартовна система-причал», що залежать від попереднього натягу тросів та геометрії та впливу зовнішніх сил. У таблиці 2 наведено значення цих норм. Як видно, для обох випадків нерівності виконані.

Таблиця 1

**Порівняння експериментальних та розрахункових даних**

Кінематичні характеристики судна при 50 % навантаження						
	x	y	z	roll	pitch	yaw
Експеримент	0,09	~ 0	0,35	0,02	0,01	~ 0
Розрахунок	0,03	~ 10 <sup>-4</sup>	0,34	~ 10 <sup>-7</sup>	0,003	~ 10 <sup>-5</sup>
Кінематичні характеристики судна при 100 % навантаження						
Експеримент	0,04	~ 0	0,20	0,01	0,02	~ 0
Розрахунок	0,02	~ 10 <sup>-4</sup>	0,22	~ 10 <sup>-6</sup>	0,001	~ 10 <sup>-5</sup>

Таблиця 2

**Валідація методу перевірки відповідності рухів судна  
встановленим обмеженням**

Оцінка для судна при 50 % навантаження						
№ тросу	Координати векторів тросів	Експериментальні значення,		Допустимі межі амплітуд		Оцінка нерівності
1f	(L, 0.5B, 0.3T)	x <sub>G</sub> , М	0,04	ε <sub>1</sub> , М	0,1	- 0,65
2f	(0.5L, 0.5B, 0.3T)	y <sub>G</sub> , М	0	ε <sub>2</sub> , М	0,1	- 1,04
3f	(0.25L, 0.5B, 0.3T)	z <sub>G</sub> , М	0,2	ε <sub>3</sub> , М	0,5	- 1,67
3a	(-0.25L, 0.5B, 0.3T)	φ, рад.	0,01	ε <sub>4</sub> , рад.	0,017	- 1,0
2a	(-0.5L, 0.5B, 0.3T)	ψ, рад.	0,02	ε <sub>5</sub> , рад.	0,017	- 1,0
1a	(-L, 0.5B, 0.3T)	θ, рад.	10 <sup>-6</sup>	ε <sub>6</sub> , рад.	0,017	- 1,0
Оцінка для судна при 100 % навантаження						
1f	(L, 0.5B, 0.3T)	x <sub>G</sub> , М	0,04	ε <sub>1</sub> , М	0,1	- 0,76
2f	(0.5L, 0.5B, 0.3T)	y <sub>G</sub> , М	0	ε <sub>2</sub> , М	0,1	- 1,03
3f	(0.25L, 0.5B, 0.3T)	z <sub>G</sub> , М	0,2	ε <sub>3</sub> , М	0,5	- 1,44
3a	(-0.25L, 0.5B, 0.3T)	φ, рад.	0,01	ε <sub>4</sub> , рад.	0,017	- 1,0
2a	(-0.5L, 0.5B, 0.3T)	ψ, рад.	0,02	ε <sub>5</sub> , рад.	0,017	- 1,0
1a	(-L, 0.5B, 0.3T)	θ, рад.	10 <sup>-6</sup>	ε <sub>6</sub> , рад.	0,017	- 1,0

**Висновки.** У роботі проведено експериментальне дослідження динаміки великотоннажного балкера, пришвартованого до причалу, під дією регулярного хвилювання в умовах мілководдя. Для цього було реалізовано фізичне моделювання в дослідному басейні з дотриманням критерію подібності Фруда та з урахуванням конструктивних і технологічних обмежень лабораторного обладнання.

У ході експерименту отримано дані щодо прискорень, поступальних і кутових переміщень судна для випадків повного та часткового завантаження. Обробка експериментальних результатів із використанням спектрального аналізу дозволила визначити домінуючі частоти та амплітуди коливань, а також виконати коректний перерахунок модельних значень на натурні умови.

Встановлено, що умови завантаження істотно впливають на характер руху пришвартованого судна. При частковому завантаженні спостерігається зростання амплітуд вертикальних і повздовжніх переміщень та збільшення періодів коливань, що зумовлено зменшенням інерційних характеристик судна. Водночас

при повному завантаженні рух судна є більш стабільним, а амплітуди коливань зменшуються.

Показано, що за розглянутого напрямку поширення хвиль і прийнятої схеми швартування поперечні та курсові коливання залишаються незначними. Це свідчить про ефективність обраної конфігурації швартовної системи в умовах регулярного хвилювання.

Порівняння експериментальних даних із результатами аналітичних розрахунків, виконаних на основі лінійної математичної моделі руху судна, підтвердило їх задовільну узгодженість. Це дозволяє вважати запропоновану модель та розроблений метод оцінки амплітуд руху придатними для практичного використання.

Підтверджено можливість застосування запропонованого підходу для перевірки відповідності рухів судна нормативним обмеженням портових служб без розв'язання повної системи диференціальних рівнянь. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування режимів стоянки суден, вибору раціональних схем швартування та підвищення безпеки вантажно-розвантажувальних робіт у недостатньо захищених акваторіях портів.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. U.S. Department of Defense. Military and Government Mooring Design (UFC 4-150-06) [Електронний ресурс]. 2023. URL: <https://www.wbdg.org>
2. Рекомендації щодо обліку гідрометеорологічного режиму при проєктуванні недостатньо захищених від хвилювання причалів: РД 31.33.10-87. Одеса : ЧОРНОМОРНІПРОЄКТ, 1987. 56 с.
3. Deltares. Scale model tests of moored vessels (Delta Basin) [Електронний ресурс]. 2021. URL: <https://www.deltares.nl/en/expertise/projects/validation-tests-for-innovative-mooring-technology-in-ports-of-the-future/>
4. MARIN ; Deltares. Benchmarking and model validation projects for moored vessel response (HAWA-III JIP) [Електронний ресурс]. 2022. URL: <https://ferforum.com/wp-content/uploads/2023/04/Project-Plan-HAWAI-3-JIP-Detailed-Description-Rev-1.4-June-2022-APPENDIX-A.pdf>
5. Harkin S., Mortensen J., Dixen M. Validation of Moored Vessel Response Simulator with Physical Model Comparisons [Електронний ресурс]. – DHI Group Technical Publication, 2017. URL: [https://www.dhigroup.com/upload/publications/mike21/Harkin\\_2017.pdf](https://www.dhigroup.com/upload/publications/mike21/Harkin_2017.pdf)
6. Aida Y., Hirayama K. Development of analysis method of moored ship motion in 3D fluid field : PARI Report No. 58-1-1. Yokosuka : Port and Airport Research Institute, 2019. August.
7. Ueda S., Shiraishi S., Oshima H., Asano K. Experimental evaluation of the tension mooring effect on the response of moored ships. Proceedings of the International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability (MARSIM '94). 1994. P. 451–460.
8. Port and Airport Research Institute. Motions of moored ships and their effect on wharf operation efficiency : PARI Report No. 026-05-09 [Електронний ресурс]. 1987. URL: <https://www.pari.go.jp/en/1987/12/1987120260509.html>

9. PIANC. Assessment of seakeeping and manoeuvring of moored ships / harbour resonance and other related issues : PIANC Working Group Reports [Електронний ресурс]. URL:<https://www.pianc.org/publications/working-group-reports>
10. OCIMF. Mooring Equipment Guidelines (MEG4). London : Oil Companies International Marine Forum, 2018.
11. Александровська Н.І., Демідюк А.В., Косой М.Б. Науково-технічне та інформаційне забезпечення вирішення питання про екстремальні навантаження на швартовні пристрої судна та причалу при вантажних операціях в умовах хвилювання: звіт про НДР / Одеський національний морський університет; за Договором № 02-НДІ/2025 від 23 червня 2025 року. Одеса, 2025. 21 с.

### REFERENCES

1. U.S. Department of Defense. (2023). Military and government mooring design (UFC 4-150-06). Whole Building Design Guide. <https://www.wbdg.org>
2. Chornomorniiproekt. (1987). Recommendations for Considering Hydrometeorological Conditions in the Design of Insufficiently Wave-Protected Berths [Rekomendatsii shchodo obliku hidrometeorolohichnoho rezhymu pry proiektuvanni nedostatno zakhyshchenykh vid khvyliuvannia prychaliv (RD 31.33.10-87)]. Odesa [in Ukrainian].
3. Deltares. (2021). Scale model tests of moored vessels (Delta Basin). URL: <https://www.deltares.nl/en/expertise/projects/validation-tests-for-innovative-mooring-technology-in-ports-of-the-future/>
4. MARIN, & Deltares. (2022). Benchmarking and model validation projects for moored vessel response (HAWA-III JIP). URL: <https://ferforum.com/wp-content/uploads/2023/04/Project-Plan-HAWAI-3-JIP-Detailed-Description-Rev-1.4-June-2022-APPENDIX-A.pdf>
5. Harkin, S., Mortensen, J., & Dixen, M. (2017). Validation of moored vessel response simulator with physical model comparisons. DHI Group. URL: [https://www.dhigroup.com/upload/publications/mike21/Harkin\\_2017.pdf](https://www.dhigroup.com/upload/publications/mike21/Harkin_2017.pdf)
6. Aida, Y., & Hirayama, K. (2019). Development of analysis method of moored ship motion in 3D fluid field (PARI Report No. 58-1-1). Port and Airport Research Institute.
7. Ueda, S., Shiraishi, S., Oshima, H., & Asano, K. (1994). Experimental evaluation of the tension mooring effect on the response of moored ships. In Proceedings of the International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability (MARSIM '94) (pp. 451–460).
8. Port and Airport Research Institute. (1987). Motions of moored ships and their effect on wharf operation efficiency (PARI Report No. 026-05-09). URL: <https://www.pari.go.jp/en/1987/12/1987120260509.html>
9. PIANC. (n.d.). Assessment of seakeeping and manoeuvring of moored ships: Harbour resonance and other related issues. URL: <https://www.pianc.org/publications/working-group-reports>

10. OCIMF. (2018). Mooring equipment guidelines (4th ed.). Oil Companies International Marine Forum.
11. Aleksandrovska, N.I., Demidiuk, A.V., Kosoi, M.B. (2025). Scientific and Technical and Information Support for Solving the Problem of Extreme Loads on Ship and Quay Mooring Devices during Cargo Operations under Wave Conditions (Research report) [Naukovo-tehnichne ta informatsiine zabezpechennia vyrishennia pytannia pro ekstremalni navantazhennia na shvartovni prystroi sudna ta pryhalu pry vantazhnykh operatsiiakh v umovakh khvyliuvannia]. Odessa National Maritime University.

Дата першого надходження статті до видання: 30.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті: 26.12.2025

## МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.5:621.436:662.99

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2025.4-27.03>

### OPTIMIZATION OF INTERCOOLING PARAMETERS FOR CHARGED AIR IN MARINE DIESEL ENGINES

A.A. Andrieiev<sup>1</sup>, N.B. Andrieieva<sup>2</sup>, O.I. Solomyentsev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., Associate Professor of the Department of Heat Engineering,  
Kherson Educational and Research Institute,  
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-6043-3700

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

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

#### Summary

**Introduction.** The efficiency of marine diesel engine power plants is primarily determined by the performance of their turbocharging systems, which must supply sufficient intake air pressure to the cylinders. At high compressor pressure ratios, nearly the entire exhaust-gas turbine power output is consumed by the compressor, leaving limited potential for waste-heat recovery or efficiency improvement. A promising method to reduce compressor power consumption is two-stage compression with intercooling, which increases air density, reduces compression work, and improves overall turbocharger efficiency. Deep intercooling enabled by waste-heat-driven ejector or absorption refrigeration systems is of particular interest. However, the optimal split of the total pressure ratio between the low- and high-pressure stages, as well as the required intercooler outlet temperature, remains to be fully defined for marine applications. **Purpose.** The purpose of this research is to evaluate the influence of intercooler depth and post-intercooler air temperature on the energy characteristics of a two-stage turbocharging system for marine diesel engines, and to determine the optimal pressure-ratio split ( $\pi_{\kappa_1}/\pi_{\kappa_2}$ ) that minimizes compressor power consumption and maximizes turbine power availability for onboard use. **Results.** A thermodynamic analysis was performed for a two-stage compressor with various post-intercooler temperatures ( $t_{\text{ПО2}} = 20\text{--}80^\circ\text{C}$ ) and ambient inlet temperatures (20 and 40°C). The results were compared with a baseline single-stage turbocharger (total pressure ratio = 4). The ratio of compressor powers ( $N/N_{\text{НПО}}$ ) exhibits a distinct optimum at  $\pi_{\kappa_1}/\pi_{\kappa_2} \approx 0.8\text{--}1.5$ , corresponding to a 5–15 % reduction in compressor power

compared to the baseline. Deep intercooling to  $t_{\text{поз}} = 20\text{--}40^\circ\text{C}$  yields the most significant savings (12–15 %), although such temperatures require refrigeration beyond the capability of seawater cooling. Deeper cooling also shifts the optimal value of  $\pi_{\kappa_1}/\pi_{\kappa_2}$  toward lower ratios. Temperature drops of 50–100°C across the heat exchangers were identified, providing design guidance for the steam generator and evaporator of waste-heat-driven refrigeration machines. The resulting increase in available turbine power enables it to be used either for electrical generation or to assist the main engine shaft power during cruising. **Conclusions.** The study confirms the effectiveness of two-stage turbocharging with intercooling in improving the energy efficiency of marine diesel engines. Optimal intercooling parameters and pressure ratio splits were identified, resulting in significant reductions in compressor work and freeing up turbine power for practical onboard applications. Deep intercooling yields the most considerable benefit but requires refrigeration-based cooling. The findings offer practical guidance for designing advanced turbocharging and heat-recovery refrigeration systems in modern marine propulsion plants.

**Key words:** intercooling, marine diesel engine, turbocharging, pressure ratio, refrigeration system, waste-heat recovery, energy efficiency.

#### ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОМІЖНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ НАДДУВУ В СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНАХ

А.А. Андрєєв<sup>1</sup>, Н.Б. Андрєєва<sup>2</sup>, О.І. Соломенцев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доцент кафедри теплотехніки,  
Херсонський навчально-науковий інститут,  
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсон, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-6043-3700

<sup>2</sup>к.п.н., доцент кафедри теплотехніки,  
Херсонський навчально-науковий інститут,  
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсон, Україна,  
ORCID ID: 0009-0007-8427-3207

<sup>3</sup>д.т.н., професор кафедри суднового машинобудування та енергетики,  
Херсонський навчально-науковий інститут,  
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсон, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-5106-6486

#### Анотація

Вступ. Підвищення ефективності суднових дизельних енергетичних установок значною мірою залежить від роботи системи турбонаддуву, яка забезпечує необхідний тиск повітря на впуску. За високих ступенів стискування компресор споживає практично всю потужність газової турбіни, що обмежує можливості рекуперації теплоти та зниження питомих витрат палива. Одним із найбільш перспективних методів зменшення роботи компресора є застосування двоступеневого стискування з проміжним охолодженням, яке знижує температуру робочого середовища, підвищує густину заряду та зменшує енергетичні витрати на стискування. Особливу увагу привертають схеми глибокого охолодження з використанням ежекторних або абсорбційних холодильних машин, що працюють від утилізованої теплоти відпрацьованих газів. Водночас

оптимальні параметри проміжного охолодження та співвідношення ступенів стискання між компресорними ступенями потребують додаткового аналізу. **Мета.** Метою роботи є визначення впливу ступеня та температури проміжного охолодження на енергетичні показники двоступеневої системи наддуву суднового дизельного двигуна, а також встановлення оптимального співвідношення ступенів стискання ( $\pi_{к1}/\pi_{к2}$ ), що забезпечує мінімальне енергоспоживання компресора та максимальну доступну потужність газової турбіни для рекуперації. **Результати.** Проведено термодинамічний аналіз роботи двоступеневого компресора з проміжним охолодженням на різних температурах повітря після інтеркулера ( $t_{\text{по2}} = 20\text{--}80^\circ\text{C}$ ) та температурі навколишнього середовища (20 та  $40^\circ\text{C}$ ). Для порівняння використано одноступеневий компресор із загальним ступенем стискання  $\pi_k = 4$ . Аналіз залежності  $N/\text{НПО}$  показав існування оптимального співвідношення  $\pi_{к1}/\pi_{к2} \approx 0,8\text{--}1,5$ , за якого енергоспоживання компресора зменшується на 5–15 % порівняно з базовою схемою. Найбільший ефект досягається під час глибокого охолодження  $t_{\text{по2}} = 20\text{--}40^\circ\text{C}$ , що забезпечує зменшення споживаної потужності на 12–15 %. Показано, що для досягнення таких температур потрібне застосування холодильних машин, оскільки охолодження забортною водою є недостатнім. Додатково встановлено, що глибше охолодження зсуває оптимум  $\pi_{к1}/\pi_{к2}$  у напрямку його зменшення. Визначено температурні перепади в теплообмінниках ( $50\text{--}100^\circ\text{C}$ ), необхідні для проєктування парогенератора та випарника у системах тепловикористовуючих холодильних машин. **Висновки.** Доведено доцільність застосування двоступеневого наддуву з проміжним охолодженням у суднових дизельних енергетичних установках. Встановлено оптимальні параметри, які мінімізують роботу компресора та підвищують загальну ефективність системи. Глибоке охолодження забезпечує найбільший енергетичний ефект, однак вимагає впровадження холодильних машин. Зменшення роботи компресора приводить до збільшення доступної потужності газової турбіни, яка може використовуватися як для електрогенерації, так і для підвищення корисної потужності головного двигуна під час руху. Отримані результати можуть бути використані під час проєктування інтегрованих систем наддуву та тепловикористовуючих холодильних машин у сучасних суднових енергетичних комплексах.

**Ключові слова:** проміжне охолодження, наддув, судновий дизельний двигун, ступінь стискання, холодильна машина, тепла утилізація, енергетична ефективність.

### Introduction

Modern marine diesel engines commonly employ turbocharging compressors with relatively high-pressure ratios ( $\pi_k \approx 2\text{--}4$ ) to boost air intake pressure. This requires almost all the exhaust-gas-driven turbine's power output, effectively utilizing the entire enthalpy drop of the exhaust gas [1]. To improve engine efficiency and recover energy, it is necessary to reduce the compressor work and unload the turbine, thereby creating a power reserve (the difference between the turbine and compressor power) that can be redirected to the engine crankshaft or used to drive an electric generator [1]. A traditional method to reduce compressor work is *intercooling*, which involves cooling the boost air between compression

stages. Conventionally, this intercooling uses seawater; however, its cooling capacity is limited, and there are few onboard consumers of the heat removed [2]. Using the heat of compressed air directly in a steam power boiler is problematic, especially at part loads when the inlet air temperature drops [3]. One promising alternative is to cool the boost air using waste-heat-driven refrigeration cycles (e.g., ejector chillers) that utilize exhaust heat to produce refrigeration. The generated cold can be used to achieve deeper intercooling of the boost air (or even the inlet ambient air), thereby increasing the cylinder air charge and enabling higher fuel delivery and engine power [4].

Figure 1 schematically illustrates the two-stage turbocharging system with intermediate air cooling considered in this study. The system consists of two compressor stages connected in series – a low-pressure (LP) stage and a high-pressure (HP) stage – with an intercooler installed between them. Such a configuration may be realized either as a single turbocharger with a two-stage compressor or as two serially connected turbochargers; from a thermodynamic perspective, both arrangements are equivalent for the analysis of compressor power consumption.

Ambient air is compressed in the LP compressor to the pressure ratio  $\pi_{k1}$  and subsequently cooled in the intercooler to a prescribed after-intercooler temperature. The cooled air then enters the HP compressor, where it is compressed to the final pressure ratio  $\pi_{k2}$  before being supplied to the engine intake manifold. The overall pressure ratio of the system is defined as  $\pi_k = \pi_{k1} \cdot \pi_{k2}$ .

The analysis is based on a steady-state thermodynamic model of two-stage compression with intermediate cooling. The total compressor pressure ratio  $\pi_k$  is fixed according to engine air-supply requirements, while the pressure ratio split between the stages is varied by changing the ratio  $\pi_{k1}/\pi_{k2}$ .

The temperature after the first compression stage is determined assuming a polytropic compression process. After cooling in the intercooler, the air temperature is reduced to the specified after-intercooler value  $t_{\text{ПО2}}$ , which serves as the inlet temperature for the second compression stage. The outlet temperature of the HP compressor is then calculated using the same polytropic relations.

The investigated system represents a **single turbocharging unit with a two-stage compressor and intermediate air cooling between the stages**. The configuration includes a low-pressure compressor, an intercooler, and a high-pressure compressor arranged in series.

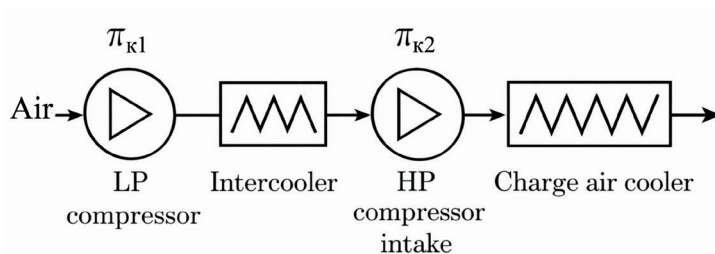


Figure 1. Schematic diagram of a two-stage turbocharging system with intermediate air cooling: LP compressor ( $\pi_{k1}$ ), intercooler, HP compressor ( $\pi_{k2}$ ), and engine intake

From a thermodynamic standpoint, this configuration is equivalent to a serial connection of two compressors within one turboaggregated system.

Figure 1 illustrates the adopted configuration and should be interpreted exclusively as a two-stage compressor with intermediate cooling.

#### Relevance to Marine Diesel Engines

The presented analysis is particularly relevant for marine diesel engines due to their specific operational characteristics. Marine propulsion and auxiliary engines typically operate at **constant rotational speed and near-constant power output** for prolonged periods, especially when driving fixed-pitch propellers or electrical generators.

Under such stable operating conditions, the turbocharging system can be optimized over a narrow, well-defined range of parameters. Additionally, marine engines are subject to **limitations in conventional seawater cooling capacity**, which restricts the achievable depth of intercooling. These constraints make advanced two-stage turbocharging systems with optimized intercooling especially attractive for marine applications.

Moreover, marine diesel engines increasingly operate at high boost pressure ratios, where compressor power consumption approaches the available turbine power. Therefore, any reduction in compressor work directly increases the available turbine power margin, which is of high practical importance for shipboard energy systems.

#### Justification of the Optimization Criterion

In this study, the optimization criterion was the minimization of **total compressor power consumption**. Both thermodynamic considerations and practical engine operation justify this choice.

Although different pressure-ratio splits result in different charge-air temperatures downstream of the intercooler and in the intake receiver, these temperature variations were explicitly accounted for in the thermodynamic model. Changes in air temperature and density at the receiver directly affect the inlet conditions of the high-pressure compressor and, consequently, its power consumption.

In the absence of a final aftercooler, the charge-air temperature supplied to the engine indeed varies with the pressure ratio distribution. However, reducing compressor work increases the available power of the exhaust gas turbine. For marine engines operating at constant speed and load, this released turbine power represents a direct energy benefit, either for mechanical assistance of the crankshaft or for onboard electricity generation.

Thus, minimizing the total compressor power is a physically meaningful and practically relevant optimization criterion for marine diesel engines with two-stage turbocharging and intermediate cooling.

#### Analytical Methodology

To determine the optimal intercooling parameters, we carried out calculations of the turbocharger power consumption as a function of the ratio  $\pi_{k1}/\pi_{k2}$  of the low-pressure ( $\pi_{k1}$ ) and high-pressure ( $\pi_{k2}$ ) compressor stages under various conditions [5]. In the analysis, the intercooler outlet (after-intercooler) air temperature,  $t_{\text{IO}2}$ , was varied (20, 40, 60, and 80°C), along with the ambient inlet temperature ( $t_{\text{in}} = 20$  and 40°C). The baseline case was defined as a single-stage turbocharger without intercooling (total pressure ratio = 4). The output parameter was the ratio of compressor powers,  $N/N_{\text{IO}}$ , where  $N$  is the power required by the baseline compressor (no intercooling) and  $N_{\text{IO}}$  is the power required by the two-stage compressor with intercooling. The results are plotted

in Figure 2. In these plots,  $N$  (no intercooling) and  $N_{\text{IO}}$  (with intercooling) are shown as functions of the pressure ratio split  $\pi_{k1}/\pi_{k2}$  at different  $t_{\text{IO2}}$  and inlet temperatures [5].

### Mathematical Model and Governing Equations

The thermodynamic analysis of the two-stage turbocharging system was carried out using a steady-state model of polytropic air compression with intermediate cooling. Each compressor stage was assumed to operate under polytropic conditions.

For a polytropic compression process, the pressure–volume relationship is given by:

$$P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$$

where  $n$  – is the polytropic exponent.

The specific work of compression for each stage is expressed as:

$$\omega_{pol} = \frac{n}{n-1} RT_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

where  $R$  – specific gas constant of air;  $T_1$  – inlet air temperature to the compressor stage;  $P_1$  and  $P_2$  – inlet and outlet pressures of the stage.

The compressor power consumption is calculated as:

$$N = \frac{\dot{m} \omega_{pol}}{\eta_p \eta_m}$$

where  $\dot{m}$  – air mass flow rate;  $\eta_p$  – polytropic efficiency;  $\eta_m$  – mechanical efficiency.

The total compressor power of the two-stage system is determined as the sum of the power consumptions of the low-pressure (LP) and high-pressure (HP) stages. The overall pressure ratio is kept constant.

### Results and Discussion

The current overall pressure ratio for marine engines is approximately 4. The results of the calculations presented below are provided for this specific pressure ratio. It should be noted that changes in the overall pressure ratio will lead to some variation in the results; however, these variations will be relatively minor and will generally correspond to the trends shown.

Figure 2 illustrates that for a turbocharged marine engine with intercooling, an optimal split of the pressure ratio exists between stages. Specifically, a ratio  $\pi_{k1}/\pi_{k2}$  in the range 0.8–1.5 produces the maximum reduction in compressor power consumption [6]. This optimal split yields a 5–15 % decrease in required turbocharger power compared to the one-stage baseline. Moreover, deeper intercooling (lower  $t_{\text{IO2}}$ ) increases the magnitude of this power saving and shifts the optimal ratio toward lower values of  $\pi_{k1}/\pi_{k2}$  [5; 7]. The most significant power reduction (over 12–15 %) is achieved when the compressed air is cooled to  $t_{\text{IO2}} = 20 \dots 40^\circ\text{C}$ . Such deep cooling is only achievable with mechanical or refrigeration cooling (beyond seawater alone). In these cases, the configuration of the ejector refrigeration system (driven by low-pressure steam) should include a high-pressure steam generator (power cycle of the refrigeration machine) to utilize the relatively high-temperature heat potential of the boost air, and an evaporator to cool the boost air to a low temperature  $t_{\text{IO2}} = 20 \dots 40^\circ\text{C}$  between the compressor stages [5; 7].

When designing the heat exchangers of the heat-recovery refrigeration system (i.e., the high-pressure steam generator and low-pressure evaporator), the relevant temperature differences in the compressed air must be known. Depending on the cooling depth, the temperature drop  $\Delta t_{\text{IIO}}$  varies approximately from 50°C to 100°C [8].

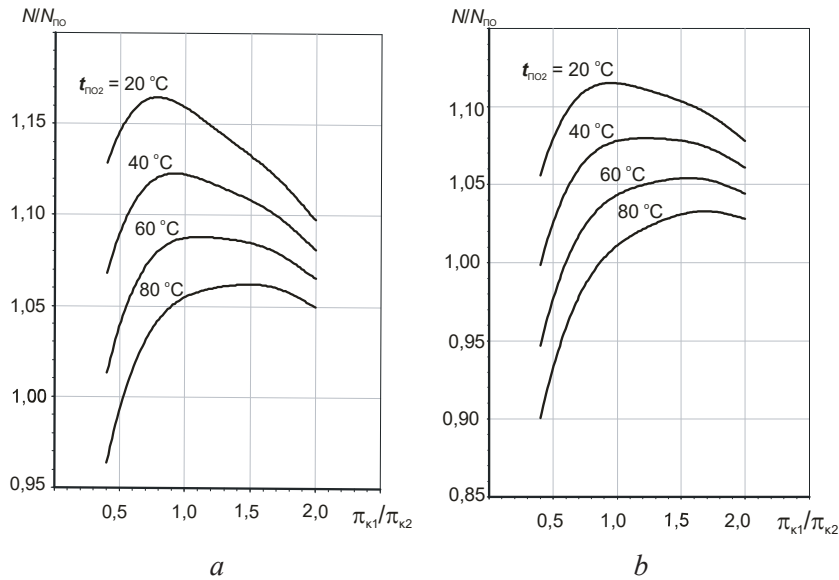


Figure 2. Dependence of the compressor power ratio  $N/N_{\text{II0}}$  on the ratio  $\pi_{k1}/\pi_{k2}$  of the low-pressure ( $\pi_{k1}$ ) and high-pressure ( $\pi_{k2}$ ) compressor stage pressure ratios, for various post-intercooler temperatures ( $t_{\text{II02}} = 20, 40, 60,$  and  $80^\circ\text{C}$ ) and inlet air temperatures  $t_{\text{in}} = 40^\circ\text{C}$  (a) and  $t_{\text{in}} = 20^\circ\text{C}$  (b)

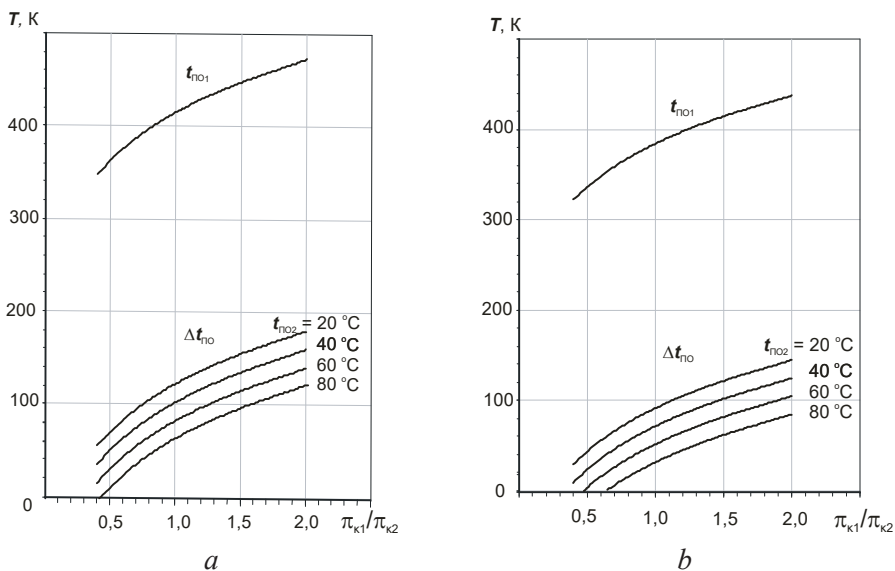


Figure 3. Dependence of the temperature after the first stage of cooling and after intercooling on the ratio  $\pi_{k1}/\pi_{k2}$  of the pressure ratios of the low-pressure ( $\pi_{k1}$ ) and high-pressure ( $\pi_{k2}$ ) compressor stages at inlet air temperatures  $t_{\text{in}} = 40^\circ\text{C}$  (a) and  $t_{\text{in}} = 20^\circ\text{C}$  (b)

Importantly, for deep intercooling applications (either boost air or inlet air), it is inefficient to reject the intermediate-temperature heat ( $\sim 40\text{--}60^\circ\text{C}$ ) through the refrigeration machine, because this yields very low ejector and thermal coefficients and consumes scarce low-temperature cooling capacity (evaporator discharge around  $0\text{--}10^\circ\text{C}$ ) [9]. Instead, that intermediate heat is more appropriately removed by seawater. In practice, similar three-section intercoolers (steam–water systems) have been used on ships for many years. Still, their drawback is low efficiency or even infeasibility of the steam-generating (water-steam) section at part-load when exhaust temperatures fall [9]. The proposed heat-recovery circuit based on low-pressure steam is relatively effective even at partial engine loads [9; 10].

Overall, the intercooling system and heat-utilization circuit should be designed around the optimal pressure ratio split to maximize turbocharger power savings. In other words, the compressor stages should be sized so that  $\pi_{k1}/\pi_{k2}$  is approximately 0.8–1.5 for optimal performance [7]. The reduction in compressor power frees up a portion of the power from the waste-heat recovery turbine, which can be used to generate electricity or to drive the main engine shaft during cruising. In summary, by selecting the optimal intercooling parameters, the engine's overall energy efficiency and output can be significantly improved.

### Conclusions

1. Optimal Compression Split: For marine diesel engines with intercooling, there exists an optimal ratio of low-stage to high-stage pressure ratios ( $\pi_{k1}/\pi_{k2}$ ) of 0.8–1.5. Using this ratio reduces the turbocharging compressor's power consumption by approximately 5–15 %.

2. Power Recovery and Use: The saved compressor power corresponds to additional power available from the gas turbine. This extra power can be utilized for onboard electrical generation or transmitted to the main engine shaft in cruising mode.

3. Intercooler-Refrigeration Design: The layout of the heat-recovery refrigeration system (e.g., ejector refrigeration) in the engine's gas–air path should be based on the identified optimal ratio. The placement of the steam generator and evaporator (between compressor stages) should be chosen to achieve the identified optimal pressure ratio split.

### BIBLIOGRAPHY

1. Shtanko O., Litvinova M., Andrieiev A., Andrieieva M., Savchuk P. Building a technological model of the exhaust gas energy recovery device for the diesel engine on small-sized vessel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. V. 1. № 8 (103). C. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.194938>.
2. Radchenko R., Kornienko V., Radchenko M., Mikielewicz D., Andreev A., Kalinichenko I. Cooling intake air of marine engine with water-fuel emulsion combustion by ejector chiller. *Modern Power Systems and Units (MPSU 2021)* : Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference, Kraków, Poland, May 19–21, 2021. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 323. Article 00031. 5 p. Published online 10 Nov 2021. DOI: <https://doi:10.1051/e3sconf/202132300031>.

3. Pyrysunko M., Radchenko A., Tkachenko V., Zubarev A., Andreev A. Marine diesel engine inlet air cooling by ejector chiller on the vessel route line / In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. DSMIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2022. C. 259–268. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-06044-1\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-031-06044-1_25).
4. Sun Y., Sun P., Zhang Z., Zhang S., Zhao J., Mei N. Performance Prediction for a Marine Diesel Engine Waste Heat Absorption Refrigeration System. *Energies*. 2022. 15 (19). 7070. DOI: 10.3390/en15197070.
5. Tian W., Du D., Li J., Han Z., Yu W. Establishment of a two-stage turbocharging system model and analysis on influence rules of key parameters. *Energies*. 2020. 13 (8). 1953. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13081953>.
6. Grönman A., Sallinen P., Honkatukia J., Backman J., Uusitalo A. Design and experiments of a two-stage intercooled electrically assisted turbocharger. *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol. 111. Pp. 115–124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.055>.
7. Watson N., Janota M. S. *Turbocharging the Internal Combustion Engine*. London, Bloomsbury Academic. 1982. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-349-04024-7>.
8. Heim K. Existing and Future Demands on the Turbocharging of Modern Large Two-stroke Diesel Engines. *Engineering, Environmental Science*. 2014. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Existing-and-Future-Demands-on-the-Turbocharging-of-Heim/b31bcb22e187744ff24d153f5c3119c3c8f7004d>
9. MAN Energy Solutions. Influence of ambient temperature conditions. Copenhagen SV, Denmark. 2023. URL: [https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/5510-0074-03.pdf?sfvrsn=fa9e1cee\\_6](https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/5510-0074-03.pdf?sfvrsn=fa9e1cee_6)
10. Wärtsilä Corporation. Combustion engine power plants: White Paper. Vaasa (Finland), 2021. *Wärtsilä Corporation*. URL: <https://www.wartsila.com/docs/default-source/power-plants-documents/downloads/white-papers/general/wartsila-bwp-combustion-engine-power-plants.pdf>

## REFERENCES

1. Shtanko, O., Litvinova, M., Andrieiev, A., Andrieieva, M., Savchuk, P. (2020). Building a technological model of the exhaust gas energy recovery device for the diesel engine on a small-sized vessel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 1 (8 (103)), 35–42. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.194938>.
2. Radchenko, R., Kornienko, V., Radchenko, M., Mikielewicz, D., Andreev, A., Kalinichenko, I. (2021). Cooling intake air of marine engine with water-fuel emulsion combustion by ejector chiller. In M. Rerak & M. Majdak (Eds.). *Modern Power Systems and Units : Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference (MPSU 2021) (E3S Web of Conferences, Vol. 323, Article 00031)*. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132300031>.

3. Pyrysunko, M., Radchenko, A., Tkachenko, V., Zubarev, A., & Andreev, A. (2022). Marine diesel engine inlet air cooling by ejector chiller on the vessel route line. In V. Ivanov, I. Pavlenko, O. Liaposhchenko, J. Machado, & M. Edl (Eds.). *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V: DSMIE 2022 (Lecture Notes in Mechanical Engineering)*, pp. 259–268. Springer. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-06044-1\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-031-06044-1_25).
4. Sun, Y., Sun, P., Zhang, Z., Zhang, S., Zhao, J., & Mei, N. (2022). Performance prediction for a marine diesel engine waste heat absorption refrigeration system. *Energies*. 15 (19). 7070. DOI: 10.3390/en15197070.
5. Tian, W., Du, D., Li, J., Han, Z., & Yu, W. (2020). Establishment of a two-stage turbocharging system model and analysis on influence rules of key parameters. *Energies*. 13 (8). DOI: <https://doi.org/10.3390/en13081953>.
6. Grönman, A., Sallinen, P., Honkatukia, J., Backman, J., & Uusitalo, A. (2016). Design and experiments of a two-stage intercooled electrically assisted turbocharger. *Energy Conversion and Management*. Vol. 111. 115–124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.055>.
7. Watson, N., Janota, M.S. (1982). *Turbocharging the Internal Combustion Engine*. London, Bloomsbury Academic. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-349-04024-7>.
8. Heim, K. (2014). Existing and Future Demands on the Turbocharging of Modern Large Two-stroke Diesel Engines. *Engineering, Environmental Science*. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Existing-and-Future-Demands-on-the-Turbocharging-of-Heim/b31bcb22e187744ff24d153f5c3119c3c8f7004d>
9. MAN Energy Solutions (2023). Influence of ambient temperature conditions. Copenhagen SV, Denmark. URL: [https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/5510-0074-03.pdf?sfvrsn=fa9e1cee\\_6](https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/5510-0074-03.pdf?sfvrsn=fa9e1cee_6)
10. Wärtsilä Corporation. Combustion engine power plants – White Paper. URL: <https://www.wartsila.com/docs/default-source/power-plants-documents/downloads/white-papers/general/wartsila-bwp-combustion-engine-power-plants.pdf>

Дата першого надходження статті до видання: 24.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.11.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті: 26.12.2025

**КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ РОЗМЕЖУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ  
І ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ  
НА ОСНОВІ ПРОДУКТОЦЕНТРИЧНОГО ПІДХОДУ**

**О.В. Кириллова<sup>1</sup>, В.Ю. Кириллова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>д.т.н., професор,  
професор кафедри «Управління портовою і сервісною діяльністю  
на водному транспорті»,

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-3714-5319

<sup>2</sup>к.т.н., доцент,  
доцент кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень»,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0003-0738-0408

**Анотація**

*У статті розглянуто проблему коректного термінологічного розмежування понять «технологічні» та «логістичні» процеси/операції у транспортній сфері в умовах активного проникнення логістичного понятійного апарату в транспортну науку та освіту. Показано, що не досить виважене запозичення дефініцій, сформованих на базі матеріальних виробництв, призводить до появи псевдологістичних термінів, термінологічних колізій і змістових підмін, зокрема у трактуванні вантажопереробних, перевізних та сервісних процесів транспорту. На основі продуктоцентричного підходу обґрунтовано, що ключовим критерієм розмежування логістичних і технологічних процесів є природа створюваного продукту (матеріальний товар чи нематеріальна транспортна послуга) і суб'єкт, який здійснює наскрізне управління матеріальним потоком. Показано, що в транспорті результатом діяльності є нематеріальна послуга, яка споживається одночасно з її виробництвом і не може бути накопичена, а більшість процесів, що у промисловій логістиці вважаються логістичними, у транспорті мають технологічну сутність, оскільки формують транспортну послугу та оперують вантажем як об'єктом праці транспорту. Запропоновано концептуальну модель трансформації статусу матеріального продукту (товар → вантаж → вантажопотік → транспортна послуга) та зміни суб'єкта управління матеріальним потоком, а також систему методологічних принципів (продуктоцентричності, функціональної ролі, контекстності, відповідності суб'єкта дослідження), що забезпечують науково вивірене термінологічне розмежування технологічних і логістичних процесів. На основі аналізу міжнародних документів (ISO, UNECE, UNCTAD, IMO) продемонстровано відсутність практики позначення технологічних дій транспорту терміном «логістика», що підтверджує некоректність уживання поширених псевдологістичних дефініцій. Сформульовано рекомендації для освіти, науки та галузевої практики щодо уніфікації термінології,*

перегляду освітніх програм і відповідних стандартів. Запропонована концептуальна модель інтегрована в наукову систему «парадигма – доктрина – концепція – стратегія» і може слугувати методологічною основою для подальших досліджень та галузевої стандартизації у транспортній сфері.

**Ключові слова:** транспортні системи, транспортні технології, транспортне виробництво, транспортна послуга, логістичні процеси, технологічні процеси, термінологічне розмежування, вантажопотік, суб'єкт управління, логістика.

### CONCEPTUAL MODEL FOR DIFFERENTIATING TECHNOLOGICAL AND LOGISTICS PROCESSES IN THE TRANSPORT SECTOR BASED ON A PRODUCT-CENTRIC APPROACH

O.V. Kyryllova<sup>1</sup>, V.Yu. Kyryllova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the department of Management of ports and service operations on water transport, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine  
ORCID ID: 0000-0002-3414-7364

<sup>2</sup>Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Fleet Operation and Shipping Technology, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine  
ORCID ID: 0000-0003-0738-0408

#### Summary

The article examines the problem of the correct terminological distinction between “technological” and “logistical” processes/operations in the transport sector amid the active penetration of logistics terminology into transport science and education. It is demonstrated that the uncritical transfer of definitions originating from material-production industries leads to the emergence of pseudo-logistics terms, terminological inconsistencies, and semantic distortions-particularly in the interpretation of cargo-handling, transport, and service operations. Using a product-centred approach, the study substantiates that the key criteria for differentiating logistical and technological processes are the nature of the resulting output (material goods vs. immaterial transport service) and the entity exercising end-to-end control over the material flow. It is shown that transport operations generate an immaterial service, which is consumed simultaneously with its provision and cannot be accumulated, and that most operations considered “logistical” in industrial logistics possess a technological nature in transport, as they form the transport service and involve cargo as the object of transport work.

The study proposes a conceptual model describing the transformation of the status of a material product (cargo) throughout its movement (goods → cargo → cargo flow → transport service) and the shift of the flow-control responsibility between actors. A system of methodological principles-product-centricity, functional role, contextuality, and actor-based applicability-is introduced to ensure a scientifically sound terminological differentiation between technological and logistical processes. Based on the analysis of international standards and documents (ISO, UNECE, UNCTAD, IMO), the article demonstrates the absence of any practice of describing transport technological operations as “logistics”, which confirms the incorrect use of widespread pseudo-logistics expressions.

*The paper formulates recommendations for education, research, and professional practice related to terminology standardization, the revision of educational programmes, and the refinement of professional standards. The proposed model is integrated into the analytical framework “paradigm – doctrine – concept – strategy” and may serve as a methodological foundation for further research and sector-wide standardization within the transport domain.*

**Key words:** *transport systems, transport technologies, transport production, transport service, logistical processes, technological processes, terminological differentiation, cargo flow, managing entity, logistics.*

**Постановка проблеми.** Еволюція транспортних технологій і систем супроводжується поступовим ускладненням, поглибленням і розширенням спеціальної термінології. На сучасному етапі у сферу транспортних досліджень активно інтегрується понятійний апарат логістики, що, з одного боку, відкриває нові можливості для комплексного аналізу ланцюгів постачання, а з іншого – формує низку термінологічних і методологічних проблем. Під впливом логістичних концепцій, які нерідко запозичуються без урахування специфіки транспортного виробництва, відбувається поступове переформатування понятійного апарату транспортної науки.

Унаслідок цього значна кількість логістичних термінів використовується у транспортній сфері некоректно, що провокує термінологічні суперечності, спотворює зміст фундаментальних понять транспортної науки та ускладнює інтерпретацію виробничих процесів у транспортній діяльності.

Однією з ключових проблем постає питання коректного розмежування понять «технологічні» та «логістичні» процеси/операції. У сфері практичної діяльності, а також навіть у наукових публікаціях, навчальних та методичних працях спостерігаються такі явища:

- використання однакових термінів з різним змістовим наповненням;
- застосування різних термінів для позначення одних і тих самих процесів.

Таке термінологічне змішування зумовлює підміну понять, ускладнює коректне трактування процесів транспортного виробництва та створює певні труднощі для студентів, викладачів, науковців і фахівців-практиків транспортної галузі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Еволюція логістики як сфери наукового знання пов'язана з розвитком ринкових відносин, інтеграцією виробничих, збутових та інформаційних функцій підприємств [1; 2]. У наукових джерелах визнається, що логістика є відносно «молодою» наукою, яка інтенсивно розвивається, а її понятійний апарат перебуває у стані постійного уточнення, формується на стику різних дисциплін і не має усталених дефініцій [1–3].

У роботах [3; 4; 5; 6] підкреслюється, що:

- відсутнє єдине трактування навіть базового терміна «логістика»;
- не сформована усталена система категорій та законів;
- до 97 % ключових термінів логістики запозичені з інших галузей знань і сфер діяльності [6];
- власні терміни логістики становлять лише близько 3 % її термінологічного апарату [6].

В Україні терміносистема логістики формується здебільшого через активне запозичення міжнародної термінології та часткове переосмислення понятійного

апарату вітчизняної транспортної науки [1–5]. Така практика часто призводить до появи «наукоподібних» слівформ зі складником «логістика» у сферах, де традиційно домінували транспортні або технологічні категорії [4, с. 190–193].

Особлива увага термінологічним протиріччям між експедируванням і логістикою, а також суттєвим відмінностям між поняттями «логістичні» та «технологічні» процеси/операції приділена у працях [5, с. 42–51; 7, с. 158–161].

Подальший розвиток цих підходів здійснено у дослідженні [8, с. 234–242], де продемонстровано, що роль (статус) одного й того самого об'єкта (порту або портового терміналу) змінюється залежно від його організаційної належності. Зокрема, якщо портовий термінал є частиною виробничого підприємства, він розглядається як елемент логістичної системи виробника, тоді як незалежний порт або термінал функціонує передусім як елемент транспортної системи, що забезпечує перевалку вантажів і не входить до логістичної системи виробника. Таке розмежування підтверджує, що змістове наповнення понятійного апарату логістики та транспорту визначається не власне характеристиками об'єкта, а тою науковою парадигмою й організаційним контекстом, у межах яких він аналізується. Відповідно, це створює підґрунтя для формування концептуальної моделі розмежування логістичних і технологічних процесів, яка враховує продуктоцентричну логіку та специфіку суб'єкта управління матеріальним потоком.

У дисертаційній праці [3, с. 52–88] обґрунтовано дуалістичний підхід до аналізу транспортно-технологічних систем, згідно з яким їх необхідно досліджувати щонайменше з двох позицій:

- з точки зору транспортної науки, що відображає виробничо-технологічні закономірності функціонування транспорту;
- з точки зору логістичного підходу, що описує взаємодію елементів систем на основі управління матеріальними потоками.

Зазначений підхід підкреслює об'єктивну необхідність чіткого термінологічного розмежування ролей і функцій логістики та технологій у транспортній діяльності, а також виявляє ризики змістових підмін у разі некоректного змішування цих категорій.

**Мета статті** – на основі продуктоцентричного підходу обґрунтувати принципові відмінності між поняттями «технологічні» та «логістичні» процеси/операції у транспортній сфері, розробити концептуальну модель їх коректного розмежування та визначити її місце у системі «парадигма – доктрина – концепція – стратегія» розвитку транспортної науки, освіти й галузевої практики.

Виходячи з мети, у статті поставлені такі завдання:

1. Проаналізувати передумови та природу термінологічних колізій і псевдологістичних дефініцій у транспортній сфері, зумовлених некритичним перенесенням логістичних термінів без урахування специфіки транспортного виробництва.
2. Розкрити продуктоцентричні особливості транспортного виробництва та нематеріальну природу транспортної послуги як підґрунтя для коректного розмежування технологічних і логістичних процесів.
3. Сформулювати систему критеріїв та методологічних принципів, що забезпечують науково обґрунтоване термінологічне розмежування технологічних процесів транспорту і логістичних процесів промислових та торговельних підприємств.

4. Розробити концептуальну модель трансформації статусу матеріального продукту і зміни суб'єкта управління матеріальним потоком.

5. Оцінити методологічне значення запропонованої концептуальної моделі для транспортної науки та обґрунтувати можливості її використання як основи для унормування термінології, формування змісту освітніх програм і стандартів.

6. Сформулювати стратегічні рекомендації щодо впровадження запропонованого термінологічного розмежування в освітню, наукову та професійну практику транспортної галузі, інтегрувавши їх у систему «парадигма – доктрина – концепція – стратегія».

#### **Виклад основного матеріалу.**

1. *Термінологічна взаємодія логістики та транспорту: запозичення, підміна понять і трансформація дефініцій.* За результатами досліджень [1; 2; 6] встановлено, що логістика формує значну частину свого понятійного апарату шляхом міжсистемного запозичення. Такий механізм забезпечує швидке становлення логістики як сучасної сфери знань, однак супроводжується низкою наслідків: варіативністю дефініцій, розмитістю меж предметної галузі, розширенням термінологічного поля за рахунок інших наук, перенесенням логістичної термінології у сфери, де традиційно домінували власні категорії (зокрема, у транспорт, виробничі технології та управлінські системи), а також тенденцією до штучної «логістизації» усталених категорій.

У транспортній сфері ця тенденція проявляється в тому, що традиційні технологічні процеси транспорту, зокрема вантажопереробні операції в портах, на терміналах і в транспортно-складських комплексах, дедалі частіше трактуються як «логістичні» виключно через їхню участь у переміщенні матеріальних потоків.

Водночас слід зауважити і зворотний вектор впливу, а саме: частина представників транспортної академічної і бізнес-спільноти активно запозичують логістичну лексику, інколи цілком обґрунтовано, прагнучи осучаснити професійну мову, але інколи й не виправдано, застосовуючи логістичні терміни до процесів, що належать до технологічного ядра транспортного виробництва. Така практика сприяє закріпленню псевдологістичних дефініцій у науковому та освітньому середовищі, а також у повсякденній діяльності підприємств транспортної галузі.

Такі підходи ігнорують специфіку транспортної продукції, яка, на відміну від продукції промислових підприємств:

- не має речовинної форми;
- не може накопичуватися й зберігатися;
- споживається одночасно з виробництвом.

Некоректне перенесення логістичних термінів у транспортну сферу без урахування нематеріальної природи транспортної послуги та технологічної структури транспортного виробництва призводить до термінологічних колізій, змістових підмін і методологічно некоректної інтерпретації технологічних процесів. Ігнорування сутнісних властивостей транспортної послуги створює передумови для формування термінів, які зовні відповідають логістичній лексиці, але суперечать природі транспортних процесів. Це зумовлює появу так званих «псевдологістичних» дефініцій, що потребують подальшого наукового осмислення та коректного термінологічного розмежування.

2. *Поява «псевдологістичних» термінів у транспортній сфері: передумови та ризики.* Розмитість понятійного апарату логістики, трансфер її термінів у суміжні сфери без адаптації, а також тенденція до термінологічного міжгалузевого розширення призводять до появи у транспортній сфері термінів, які містять логістичний компонент, але відображають технологічні процеси виробництва транспортної послуги. Типові приклади таких словосполучень: «логістичні навантажувально-розвантажувальні операції в порту»; «логістичні процеси вантажопереробки»; «логістична технологія буксирного супроводу суден»; «логістика агендування суден» тощо. Насправді всі ці штучно «логістизовані» процеси:

- виступають основними або допоміжними елементами технології транспортного виробництва;
- безпосередньо формують нематеріальний продукт транспорту – транспортну послугу;
- є невід’ємною частиною транспортного, перевізного та вантажопереробного процесів.

Попри це, через зовнішню подібність до логістики (наявність елемента переміщення чи складування тощо) такі технологічні операції помилково позначаються як «логістичні». Передумови появи подібних «псевдологістичних» термінів полягають у такому:

- міжсистемне запозичення термінів логістики без адаптації до предметної галузі транспорту;
- механічне перенесення промислових логістичних моделей у сферу, де продукт не є матеріальним;
- маркетингова та популяризація терміна «логістика» як сигнатури інноваційності;
- недостатня диференціація між транспортною логістикою і технологією транспортних процесів в освіті та літературі.

Ризики застосування псевдологістичних дефініцій полягають у тому, що вони призводять до:

- розмивання меж транспортної науки й підміни її понятійного апарату;
- спотворення змісту технологічних процесів та їх некоректної класифікації;
- появи псевдонаукових інтерпретацій у навчальних та наукових джерелах;
- дискредитації логістики як наукового інструменту управління матеріальними потоками у ланцюгах постачання та перетворення її на декоративний термін.

3. *Специфіка транспортного виробництва як основа термінологічного розмежування.* Транспортне підприємство є виробничим, однак його продукція має принципово іншу природу, ніж продукція промислових підприємств. Це зумовлює необхідність застосування окремих підходів до термінології та класифікації процесів, зокрема до розмежування технологічних і логістичних операцій у межах транспортної діяльності.

Ключові продуктоцентричні особливості транспортного виробництва:

- продукція транспорту – це послуга з переміщення вантажів<sup>1</sup>. Транспорт не створює матеріальних благ, а змінює просторово-часові характеристики вже

---

<sup>1</sup> Пасажирський транспорт має іншу природу споживання послуги і не формує логістичної категоризації матеріальних потоків, тому пасажирські перевезення не розглядаються в межах продуктоцентричного підходу до класифікації транспортних процесів.

виробленої продукції (товару), забезпечуючи її переміщення в просторі й часі між елементами виробничо-збутового середовища та формуючи доступність продукції для споживача;

– відсутність речовинної форми. Транспортна послуга не має матеріальної форми, її неможливо накопичувати чи зберігати у вигляді певного запасу. Після завершення перевезення послуга вичерпана, адже її виробництво і споживання відбуваються одночасно;

– невіддільність виробництва та споживання. На відміну від товарів промисловості, які виробляються і споживаються у різний час, транспортна послуга споживається в момент її створення;

– зміна статусу товару. З моменту пред'явлення товару до перевезення він переходить у статус вантажу – об'єкта праці транспорту; після доставки знову набуває статусу товару для наступних етапів ланцюга постачання.

Водночас продукцією транспорту є не лише послуга перевезення, а й широкий спектр супутніх та спеціалізованих видів діяльності, що реалізуються на ринку транспортних послуг, зокрема:

- перевезення та обслуговування пасажирів, багажу і пошти;
- вантажно-розвантажувальні та вантажноперевалочні роботи;
- зберігання, складування та обробка вантажів;
- обслуговування та забезпечення безпечної стоянки суден;
- транспортно-експедиторські послуги;
- митно-брокерський супровід вантажів і транспортних засобів;
- фрахтування, агентування, сюрвейерські послуги та інші види діяльності,

що забезпечують виконання або підготовку перевезення.

Усі ці операції мають нематеріальну природу, є результатом діяльності транспортного підприємства та формують ринкову транспортну послугу, незалежно від того, пов'язані вони безпосередньо з переміщенням чи зі створенням умов для його здійснення.

Таким чином, технологічними для транспортного підприємства є всі процеси, що безпосередньо забезпечують створення його продукції – транспортної послуги. До технологічних процесів належать:

- виробництво транспортної послуги (транспортний процес як виробничий);
- виконання вантажопереробних робіт (навантаження, розвантаження, перевалка тощо);
- здійснення перевізного процесу (переміщення вантажу транспортними засобами);
- супровідні виробничо-сервісні дії (кріплення вантажу, митно-брокерські процедури, документальне оформлення, транспортно-експедиторське обслуговування вантажопотоків, агентування суден тощо).

Отже, ті процеси, які у виробничій логістиці класифікуються як «логістичні операції», у транспортному виробництві становлять ядро технології створення транспортної послуги, а не логістичний елемент управління матеріальними потоками.

Таким чином, нематеріальна природа транспортної продукції, невіддільність її виробництва від споживання та її орієнтованість на створення послуги, а не матеріального товару визначають, що транспортні процеси мають класифікуватися

виключно як технологічні, навіть якщо вони супроводжують рух матеріальних потоків. Саме ці властивості формують методологічне підґрунтя для коректного розмежування термінів «технологічні» та «логістичні» процеси / операції у транспортній сфері.

4. *Порівняльна логіка виробничої логістики та транспортного процесу: критерії термінологічного розмежування.* Логіка транспортного виробництва об'єктивно визначає технологічний характер процесів переміщення, перевалки та супроводу перевезень, які у системі промислової логістики традиційно вважаються логістичними. Це підкреслює необхідність формування термінологічної моделі, що коректно відображає природу транспортної діяльності та усуває ризики псевдологістичних інтерпретацій.

4.1. *Логіка виробничої логістики.* З позиції традиційної логістичної концепції, орієнтованої на діяльність промислових і торговельних підприємств, логістика досліджує процеси наскрізного управління матеріальним потоком – від закупівлі сировини до доведення готової продукції до кінцевого споживача. У межах цієї парадигми:

– «технологічні процеси/операції» – це цілеспрямовані дії, результатом яких є виробництво матеріальних благ, тобто якісне перетворення предметів праці (сировини, напівфабрикатів) на готовий матеріальний продукт (товар);

– «логістичні процеси/операції» – це всі інші цілеспрямовані дії, що забезпечують наявність готового матеріального продукту у потрібному місці, у потрібний час, у потрібній кількості та якості (пакування, складування, навантаження, перевезення, розвантаження тощо).

Матеріальна природа продукції промислових підприємств визначає можливість і доцільність поділу процесів на технологічні та логістичні, оскільки матеріальний продукт:

- має речовинну форму;
- може накопичуватися та зберігатися;
- не споживається в момент виробництва.

Для транспорту така логіка є непридатною, оскільки транспорт не створює матеріального продукту, а формує нематеріальну транспортну послугу, яка змінює просторово-часові характеристики вантажу та створює додану вартість у результаті комплексу технологічних процесів і операцій, що забезпечують його переміщення (включно з перевалкою, обробкою, подачею, маневровими операціями, забезпеченням безпеки та іншими супровідними діями). Тому процеси, які в промисловій логістиці класифікуються як «логістичні», у транспорті за своєю сутністю є технологічними, оскільки входять до виробничого ядра транспортної діяльності.

4.2. *Логіка транспортного процесу у контексті техніко-технологічних систем.* У транспортному виробництві процеси переміщення, перевалки експедирування, митного оформлення, агентування, буксирування та інші пов'язані дії є технологічними, оскільки створюють продукцію транспорту – нематеріальну послугу. Будь-який процес створення продукції (матеріальної чи нематеріальної), як відомо, є технологічним. Отже, ті самі операції, які у виробничій логістиці належать до логістичних, у транспорті мають технологічну природу, оскільки

забезпечують формування кінцевого продукту транспортного підприємства – транспортної послуги.

Важливий методологічний акцент. Як доведено у роботі [3, с. 64–65], вимоги, які сучасна логістика формулює як «правило 7R»<sup>2</sup>, у транспортно-технологічних системах виконувалися задовго до виникнення логістики. Їхнє пізніше перейменування на «логістичний мікс» не змінює того факту, що за сутністю вони були елементами технологічної організації транспортного процесу, а не логістичними критеріями. Тому відповідність «правила 7R» не є ознакою логістичності системи і не перетворює технологічний процес на логістичний.

Для транспортного підприємства базова структура транспортного процесу має такий вигляд:

**Формування вантажопотоку → Транспортний процес (що включає: процес перевалки вантажів у пункті відправлення; перевізний процес; процес перевалки вантажів у пункті призначення) → Доведення вантажу до одержувача**

У цій логіці транспортний процес – це основний виробничий технологічний процес, який охоплює [9, с. 106]:

а) технологічні процеси/операції перевалки вантажів<sup>3</sup> у пунктах відправлення та призначення (навантаження, розвантаження, укладання, кріплення, складування тощо), які є елементами технології, без яких перевезення неможливе;

б) технологічні процеси / операції перевезення – безпосереднє переміщення вантажу у часі й просторі;

в) супровідні види діяльності (експедирування, митно-брокерський супровід, агентування суден, організація «останньої милі» тощо), які також забезпечують виробництво послуги та є технологічно невід’ємними від транспортного процесу.

Таким чином, у транспортному виробництві матеріальний продукт не створюється. Продуктом виступає нематеріальна послуга переміщення, що споживається одночасно з її виробництвом. Це визначає технологічний статус процесів транспортування, вантажопереробки, експедирування та супроводу перевезень. Технологічний характер цих процесів зумовлений не їхньою назвою чи формальною функцією, а тим, що саме вони створюють кінцевий результат діяльності транспортного підприємства – транспортну послугу.

*4.3. Критерії розмежування технологічних і логістичних процесів у транспорті.* Термінологічне розмежування логістичних і технологічних процесів у транспортній сфері ґрунтується на специфіці транспортної продукції та функціональній ролі транспорту у суспільному виробництві.

На відміну від промислового підприємства, яке створює матеріальний продукт, транспорт виробляє нематеріальну транспортну послугу, що характеризується такими властивостями, як: відсутність речовинної форми; неможливість

---

<sup>2</sup> Логістичний мікс, або правило «Семи R» формулюється так: «забезпечення наявності необхідного товару в необхідній кількості та заданої якості в потрібному місці, у встановлений час, для конкретного споживача, з найменшими витратами».

<sup>3</sup> Технологічний процес перевалки вантажу (вантажоперевалки) – складний технологічний комплекс, що включає робочі процеси перевантаження, зокрема навантаження та розвантаження вантажу, а також пов’язані з ними додаткові й допоміжні операції, які здійснюються з вантажем, транспортними засобами та перевантажувальними ресурсами порту до початку, під час та після завершення вантажних робіт.

накопичення чи зберігання; одночасність виробництва і споживання. Саме тому для транспортного підприємства всі процеси, які забезпечують переміщення вантажу у просторі та часі, а також операції вантажопереробки, експедирування, митного оформлення, агентування, буксирування та інші виробничо-сервісні дії мають технологічну природу, оскільки формують продукцію транспортного підприємства – транспортну послугу. Для суб'єктів ринку транспортних послуг ці дії не є «логістичними» (у розумінні промислової логістики), а становлять ядро транспортного виробництва.

Водночас у межах транспортного підприємства також існують логістичні процеси, але вони виконують забезпечувальну функцію, а не формують основну послугу. Такі процеси охоплюють: забезпечення паливом, матеріалами та ЗІП; ремонтні ресурси й інструменти; документаційні та інформаційні потоки; внутрішнє складське забезпечення. Це сфера внутрішньовиробничої логістики транспортного підприємства, яка підтримує технологічний процес, але не визначає його змісту та не створює транспортну послугу.

Рисунок 1 ілюструє логіку виникнення або втрати логістичного статусу процесів доставки залежно від суб'єкта управління потоком.

Процеси переміщення товару та доведення його до споживача зберігають логістичний характер лише тоді, коли підприємство-виробник здійснює наскрізне управління матеріальним потоком, контролюючи виробництво, складування, відвантаження та доставку власного товару (рис. 1).

Якщо ж управління процесами перевезення, перевалки, експедирування, митного оформлення або супроводу передано іншим суб'єктам ринку транспортних послуг, тоді:

- для виробника такі процеси залишаються логістичними лише з позиції їх цільового призначення (доставка власного товару), але він уже не керує потоком;
- для транспортного підприємства ці самі процеси мають технологічний статус, оскільки саме воно керує вантажопотоком і виробляє транспортну послугу.

Таким чином, під час визначення логістичного статусу процесів доставки визначальним є не вид дії (перевезення, перевалка, експедирування тощо), а суб'єкт управління потоком та характер створюваної продукції: матеріальної (товар) чи нематеріальної (послуга).

Отже, у процесі доведення продукції до споживача змінюється як статус матеріального об'єкта, так і суб'єкт, відповідальний за управління ним (рис. 2): товар → вантаж → вантажопотік → транспортна послуга.

На етапі виробництва це товар, що перебуває під логістичним управлінням виробника. Після передачі перевізнику він набуває статусу вантажу, тобто об'єкта праці транспортної сфери, і втрачає логістичний статус у змістовому значенні управління потоками. У процесі переміщення вантаж існує у формі вантажопотоку, що співіснує з транспортним потоком (наприклад, тоннажопотоком). Результатом взаємодії цих потоків є транспортна послуга – нематеріальний продукт, який створюється та споживається одночасно з виконанням технологічного процесу.

Момент передачі товару перевізнику є точкою переходу від логістичного управління до технологічного процесу транспорту.

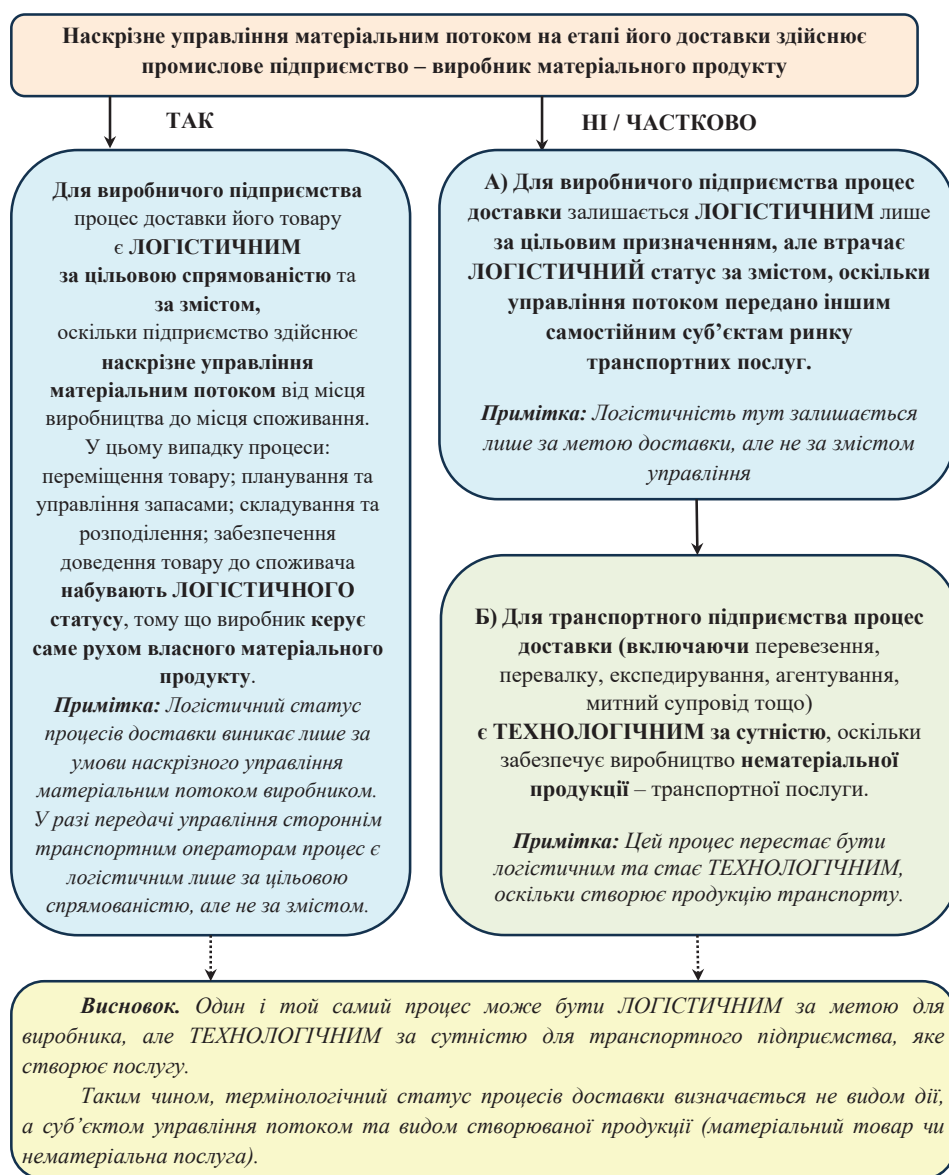


Рис. 1. Концептуальна модель умов логістичного статусу процесів доставки

Таким чином, логістичний або технологічний характер процесу визначається не його найменуванням, а:

- суб'єктом управління матеріальним потоком,
- видом продукції – матеріальний продукт чи нематеріальна транспортна послуга.

Для виробника доставка має логістичний зміст лише в аспекті мети – доведення товару до споживача.

Для транспортного підприємства цей процес є технологічним, бо формує його продукцію – транспортну послугу.

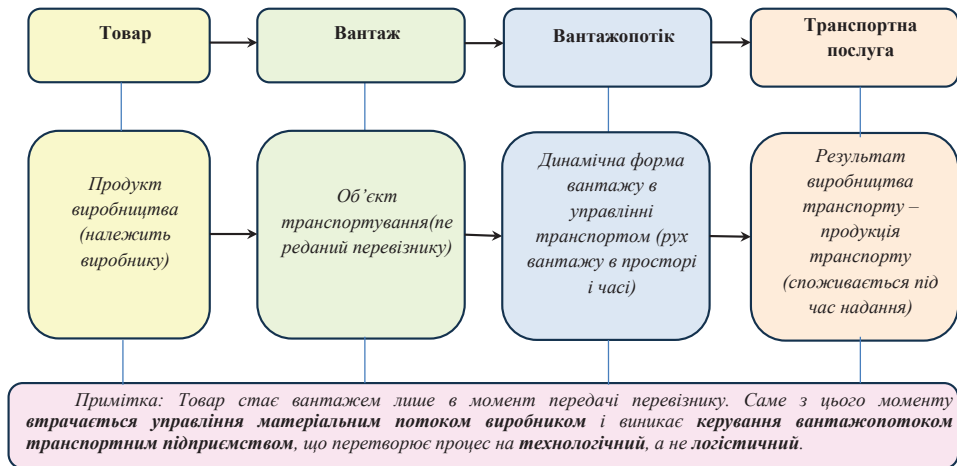


Рис. 2. Трансформація матеріального продукту в об'єкт транспортування і результат транспортної діяльності

Логістика існує там, де виробниче або торговельне підприємство зберігає наскрізне управління матеріальним потоком.

Транспортні технології виникають там, де здійснюється виробництво транспортної послуги, незалежно від того, пов'язана вона з переміщенням, перевалкою, експедируванням, митним супроводом тощо.

Відповідні критерії відображено в табл. 1.

У структурі економічної діяльності та в завершенні суспільного виробництва транспорт виконує специфічну функціональну роль – забезпечує просторово-часову трансформацію товару, створюючи додану вартість через зміну місця та часу його доступності. Саме ця властивість визначає унікальність транспорту як галузі, що не створює матеріальний продукт, а формує нематеріальну транспортну послугу.

Отже, транспорт виконує низку соціально-економічних функцій:

- забезпечує продовження виробничого процесу поза межами підприємства-виробника через переміщення його продукції та виконання супровідних виробничо-сервісних дій;
- формує нові просторово-часові властивості продукції, що перебуває у формі вантажу;
- створює додану вартість через зміну місця та часу доступності товару;
- забезпечує завершення виробничого циклу шляхом переміщення продукції в просторі та часі та виконання супровідних технологічних операцій.

Підприємство-виробник може зберігати економічний або інформаційний контроль над товаром (tracking, monitoring), однак такий контроль не є управлінням матеріальним потоком за змістом. Отже, він не визначає логістичний статус процесів.

Таким чином, логістичне управління матеріальним потоком завершується в момент, коли суб'єкт втрачає можливість здійснювати наскрізне управління матеріальним потоком. Подальший рух потоку відбувається в межах транспортних технологій, результатом яких є нематеріальний продукт – транспортна послуга.

Таблиця 1

**Критерії розмежування технологічних і логістичних процесів у транспорті**

Критерій	У промисловій логістиці	У транспортному виробництві
Вид продукції	Матеріальний продукт (товар, сировина, напівфабрикат)	Нематеріальна продукція – транспортна послуга (перевезення, перевалка, експедирування, митно-брокерське оформлення, агентування, буксирування тощо)
Можливість накопичення	Можлива: товар можна зберігати, складувати, формувати запаси	Неможлива: послугу не можна накопичити або зберігати; вона існує лише під час виконання технологічного процесу
Функціональна роль логістики	Організовує та забезпечує рух матеріального продукту від джерела походження до споживача за умови наскрізного управління матеріальним потоком	Забезпечує ресурсне та інформаційне забезпечення технології виробництва транспортної послуги (ПММ, ЗІП, матеріали, документообіг, інформація); логістика є внутрішнім забезпеченням транспортного виробництва, а не способом надання послуги
Статус транспортування	Логістична функція ланцюга постачання (за умови управління потоком виробником)	Технологічне ядро транспортного виробництва – транспортування та супровідні сервіси є процесами <b>створення послуги</b> , а не логістичними операціями
Складування	Стратегічний елемент обігу: формування запасів матеріальної продукції (товарів)	Складається лише вантаж як об'єкт транспортування; послуга не може бути складована, оскільки виробляється і споживається одночасно
Кінцева цінність	Новий матеріальний продукт (товар), що може бути об'єктом власності та зберігання	Зміна просторово-часових властивостей вантажу як результат технологічного процесу транспорту (створення доданої вартості через переміщення або сервіс)
Суб'єкт управління потоком	Виробник або торговельне підприємство <b>управляє товаром і потоком</b> , якщо забезпечено наскрізне управління	Управління переходить до транспортних операторів (перевізників, експедиторів, портових операторів тощо); процеси набувають технологічної сутності, оскільки забезпечують виробництво послуги

У цьому контексті логістика діє лише доти, доки суб'єкт зберігає реальний вплив на матеріальний потік, тоді як після передачі цього управління транспортним операторам процеси набувають технологічного статусу.

Аналіз міжнародних документів (ISO, UNECE, UNCTAD, IMO) також підтверджує чітке розмежування логістичних і технологічних процесів (табл. 2), що унеможливило використання штучних і псевдонаукових словоформ, які підміняють технологічну природу транспортної діяльності.

5. *Методологічні принципи термінологічного розмежування «технологічних» і «логістичних» процесів/операцій у транспортній галузі.* З огляду на викладене доцільно сформулювати систему науково обґрунтованих принципів, що забезпечують коректне термінологічне розмежування між логістичними та технологічними процесами / операціями.

А. *Принцип продуктоцентричності.* Якщо об'єктом є матеріальний продукт (товар, сировина, напівфабрикат) з типовою схемою його обігу «виробництво – зберігання – розподіл», застосування терміна «логістичні процеси / операції» є цілком обґрунтованим.

Таблиця 2

**Міжнародні стандарти, що підтверджують відмінність технологічних і логістичних процесів**

– Організація	– Стандарт / документ	– Що підтверджує
– ISO (International Organization for Standardization)	– ISO 28001, ISO 20858 (Port Facility Security), ISO 9001 (Service Production Standard)	– Процеси транспорту визначаються як “ <b>production of transport service</b> ”, а не логістика
– UNECE (United Nations Economic Commission for Europe)	– UN/CEFACT Recommendation 33, 34 (Single Window, Port Community Systems)	– Транспортні операції класифікуються як “ <b>service operations</b> ”, логістика відноситься лише до управління потоком
– UNCTAD (United Nations Conference on Trade and Development)	– Port Management Series (Vol. 1–6)	– Перевалочні, буксирні, агентські процеси / операції визначаються як “ <b>port technological services</b> ”
– IMO (International Maritime Organization)	– SOLAS, ISPS, MARPOL, FAL Convention	– Усі процеси в порту класифікуються як технологічний сервіс транспорту

Якщо ж об’єктом є транспортна послуга, яка не має речовинної форми, не може бути накопичена та споживається одночасно з її виробництвом, то процеси, що забезпечують її створення, мають визначатися як технологічні процеси / операції.

Б. *Принцип функціональної ролі процесу.* Процеси, що безпосередньо формують основну продукцію, мають технологічний характер.

У транспортній сфері до них належать: перевезення, перевалка, експедирування, митно-брокерський супровід, агентування суден, буксирування, оперування флотом, фрахтування суден та інші виробничо-сервісні дії.

Процеси, що забезпечують наскрізне управління матеріальними, інформаційними та фінансовими потоками навколо основного виробництва, можуть вважатися логістичними, але лише за умови, що суб’єкт реально управляє матеріальним потоком у формі товару як власного продукту.

В. *Принцип контекстності використання терміна.* У теорії транспортних процесів і систем термін «технологічні процеси/операції» є коректним для позначення комплексу дій, що забезпечують виробництво транспортної послуги (транспортний, вантажопереробний, перевізний процеси тощо). Їхнім результатом є нематеріальна продукція, що не може накопичуватись і споживається в момент її створення.

Термін «логістичні процеси» є коректним лише за умови, що суб’єкт (промислове або торговельне підприємство) зберігає наскрізне управління матеріальним потоком, тобто товаром як власним матеріальним продуктом. Це відповідає базовій сутності логістики та її ключовому визначенню – наскрізне управління матеріальним потоком і пов’язаними з ним інформаційними та фінансовими потоками.

Якщо управління процесами переміщення передається транспортним операторам, відповідні процеси для промислових і торговельних підприємств зберігають логістичний характер лише за цільовим призначенням (доставка товару до споживача), проте втрачають логістичну сутність і набувають технологічного

статусу, оскільки формують транспортну послугу і оперують вантажем як об'єктом праці транспорту.

Г. *Принцип відповідності суб'єкта дослідження.* Логістику на транспорті, у тому числі внутрішньопортову логістику, повинні досліджувати фахівці-транспортники, які володіють теорією транспортних процесів і систем, розуміють специфіку транспортної послуги, особливості діяльності транспортних підприємств і природу ринку транспортних послуг.

Саме така фахова компетентність унеможлиблює некоректне перенесення категорій промислової логістики на транспортну сферу та забезпечує коректну інтерпретацію термінів у контексті виробництва нематеріальної транспортної послуги.

Запропоновані принципи створюють науково цілісну методологічну основу для формування коректного термінологічного апарату транспортної науки. Вони можуть слугувати орієнтиром для: подальших теоретичних досліджень у сфері транспортних процесів і систем; розроблення державних і галузевих стандартів освіти; формування професійних стандартів та кваліфікаційних вимог; уніфікації термінології в наукових публікаціях і практичній діяльності.

Б. *Значення термінологічної моделі для транспортної науки.* Запропоноване термінологічне розмежування технологічних і логістичних процесів у транспорті має не лише класифікаційне, а й методологічне значення для транспортної науки. Воно дає змогу:

- уніфікувати термінологію у дослідженнях транспортних процесів, портів і термінальних систем, транспортного сервісу;
- забезпечити послідовність понятійного апарату у фундаментальних та прикладних наукових розробках;
- усунути псевдологістичні дефініції, замінивши їх коректними технологічними поняттями;
- чіткіше розмежувати терміни, пов'язані з управлінням матеріальними потоками, і терміни, що описують технологію транспортної діяльності;
- узгодити термінологію з реальною природою транспортного виробництва та специфікою нематеріального продукту (транспортної послуги).

У ширшому науковому контексті зазначена концептуальна модель формує категоріальну основу спеціалізованої наукової школи, яка виходить із продуктоцентричних характеристик транспортної діяльності, а не з механічного перенесення логістичних концепцій, сформованих на базі матеріальних виробництв. Це дозволяє розглядати процеси вантажопереробки, транспортування та сервісного супроводу як технологічні процеси виробництва транспортної послуги, а не як «логістичні» процеси за своєю сутністю.

Отже, запропонована концептуальна модель може бути використана як нормативна основа для стандартизації термінології транспортної науки, а також як методична база для освітніх програм і професійної підготовки фахівців. Це, своєю чергою, зумовлює необхідність формування практичних рекомендацій для освітнього та професійного середовища.

7. *Рекомендації для освіти та професійного середовища.* Отримані результати мають важливі наслідки для освітньої та професійної практики. Вони

підтверджують стратегічну роль транспортної освіти та потребу у фахівцях-транспортниках, здатних:

- реалізовувати технологічне виробництво транспортних послуг (перевезення, вантажоперевалка, супровід вантажопотоків, експлуатація флоту, терміналів та інфраструктури);
- забезпечувати логістичний супровід реалізації цих послуг;
- професійно управляти товаропотоками промислових підприємств з урахуванням технологічної специфіки транспорту.

Ринок транспортних послуг нині характеризується високим рівнем регламентації, стандартизації та техніко-технологічної складності. Більшість спеціальностей галузі знань J «Транспорт і послуги» належать до регульованих професій, що передбачає спеціальні вимоги до змісту та рівня підготовки (накази МОН України № 373 від 27.02.2025 і № 437 від 11.03.2025), а також відповідає вимогам міжнародних організацій (ІМО, UNECE, IAPH тощо). З огляду на це доцільно рекомендувати:

1. *Для освітніх програм* – чітко розмежувати у змісті освітньої підготовки (освітніх програмах, навчальних планах, програмах навчальних дисциплін та методичних матеріалах) поняття «технологічні» та «логістичні» процеси / операції, відображаючи продуктоцентричні особливості транспортної послуги та уникаючи некоректного перенесення термінів промислової логістики на транспортні технології.

2. *Для підручників і навчальних посібників* – переглянути термінологію, вилучити псевдологістичні словосполучення («логістика перевалки», «логістика агентування», «логістика швартових операцій» тощо) та замінити їх коректними технологічними дефініціями, що відповідають змісту виробництва транспортної послуги.

3. *Для освітніх стандартів і галузевих документів* – закріпити відмінність між логістичним управлінням матеріальними потоками та технологічними процесами транспортного виробництва, чітко відобразивши її у профілях компетентностей, посадових інструкціях та вимогах до кваліфікації.

4. *Для транспортних та промислових підприємств* – розвивати логістичні компетентності на основі техніко-технологічної підготовки фахівців транспорту, а не замінювати її суто економіко-менеджерськими підходами.

Підсумовуючи, зазначимо, що не кожне переміщення є логістикою. Логістичним воно є лише тоді, коли здійснюється під управлінням суб'єкта, чия матеріальна продукція доставляється. Якщо ж управління переходить до транспортних підприємств, відповідні дії належать до сфери транспортних технологій і формують нематеріальний продукт – транспортну послугу.

8. *Місце дослідження у системі «парадигма – доктрина – концепція – стратегія».* Попри те, що розмежування логістичних і технологічних процесів у транспортній галузі є методологічно очевидним і безпосередньо впливає з природи транспортного виробництва, у науково-освітньому просторі воно досі не було послідовно та цілісно структуроване. Протягом тривалого часу дефініції, запозичені з промислової логістики, механічно переносились у контекст транспортних технологій, що спричиняло термінологічну фрагментарність, семантичні помилки

та змістові підміни. Сформовані у статті положення мають системотворчу роль і вибудовують чітку методологічну вертикаль:

*А. Парадигма.* Формується нова наукова рамка мислення, у центрі якої – продуктоцентрична природа транспортної діяльності та онтологічна різниця між управлінням матеріальним потоком і виробництвом транспортної послуги. Вона спростовує поширене уявлення про «логістичність» будь-якого переміщення та встановлює, що логістика і транспортна технологія належать до різних рівнів суспільного виробництва та мають різну предметність.

*Б. Доктрина.* Парадигма конкретизується у вигляді системи принципів (продуктоцентричність, функціональна роль, контекстність, відповідність суб'єкта управління), які визначають умови, за яких процес може вважатися логістичним чи технологічним. Доктрина усуває термінологічну невизначеність і формує нормативні рамки використання термінів.

*В. Концепція.* Запропонована концептуальна модель описує послідовну трансформацію матеріального продукту під час його доведення до споживача:

товар → вантаж → вантажопотік → транспортна послуга

Модель відображає зміну суб'єкта управління, момент втрати логістичного змісту та набуття технологічної сутності, а також взаємодію матеріального й транспортного потоків. Вона узгоджена з рисунками 1, 2 та таблицями 1, 2.

*Г. Стратегія.* Сформульовано стратегічні напрями розвитку освіти, науки й галузевої практики: стандартизація термінології, перегляд освітніх програм, усунення псевдологістичних термінів, узгодження освітніх стандартів із продуктоцентричною логікою, підсилення ролі фахівців-транспортників у формуванні термінологічної системи.

**Висновки.** У проведеному дослідженні обґрунтовано, що термінологічне розмежування технологічних і логістичних процесів у транспортній сфері повинне спиратися не на сам факт переміщення вантажів чи виконання супровідних дій, а на вид продукції, яка створюється в результаті процесу, та суб'єкта, який здійснює управління матеріальним потоком.

1. Визначено природу термінологічних колізій, що виникають через перенесення логістичних дефініцій у транспортну сферу без урахування специфіки транспортного виробництва та особливостей його продукції. Показано, що в транспорті результатом діяльності є нематеріальна послуга, а управління здійснюється вантажем, вантажопотоками і транспортними потоками, що потребує інших критеріїв для розмежування логістичних і технологічних процесів.

2. Доведено, що технологічні процеси транспорту – це процеси виробництва нематеріальної транспортної послуги (перевезення, перевалка, експедирування, митно-брокерські процедури, агентування, буксирування тощо), яка споживається одночасно з її створенням і не може бути накопичена.

3. Логістичні процеси виникають лише за умови, що суб'єкт (виробник або торговельне підприємство) зберігає наскрізне управління товаром як власним

матеріальним продуктом у межах повного руху матеріального потоку – від джерела походження до кінцевого споживача.

4. Момент передачі управління матеріальним продуктом транспортному підприємству є ключовою точкою зміни статусу процесів: логістичний контур управління завершується, а процеси набувають технологічної сутності, оскільки формують транспортну послугу.

5. Аналіз міжнародних стандартів (ISO, UNECE, UNCTAD, IMO) засвідчує, що технологічні дії транспорту не позначаються терміном «логістика», що підтверджує некоректність уживання псевдологістичних дефініцій типу «логістика перевалки», «логістика буксирування», «логістика агентування» тощо.

6. Запропонована концептуальна модель розмежування базується на чітких методологічних принципах – продуктоцентричності, функціональній ролі процесу, контекстності використання терміна та відповідності суб'єкта дослідження. Модель усуває термінологічні колізії та формує науково вивірене понятійне поле транспортної науки.

7. Показано наукове значення моделі, яка може слугувати методологічною основою для системного унормування термінології транспортної науки та забезпечувати коректне формування змісту навчальних дисциплін і наукових досліджень у сфері транспортної діяльності без змішування технологічних і логістичних понять.

8. Сформульовано рекомендації для освітньої й галузевої практики, що передбачають чітке розмежування технологічних процесів транспорту і логістичних процесів промислових підприємств на основі природи продукту та суб'єкта управління потоком. Це забезпечує коректність освітніх стандартів, підручників, професійних компетентностей і галузевої діяльності транспортних підприємств.

9. Запропоноване термінологічне розмежування логістичних і технологічних процесів у транспорті інтегрується в наукову систему «парадигма – доктрина – концепція – стратегія». Парадигма продуктоцентричного підходу визначає базову відмінність між управлінням матеріальним потоком і виробництвом транспортної послуги; на її основі формуються доктринальні принципи, концептуальна модель трансформації статусів продукту та стратегічні рекомендації для освіти, науки й практики.

Викладені положення не створюють штучних новацій, а систематизують знання, які логічно випливають із природи транспортних процесів, але тривалий час залишалися неузгодженими у науково-освітньому середовищі. Запропонована модель забезпечує методологічну цілісність, підвищує коректність термінологічного апарату транспортної науки та може слугувати основою для подальших досліджень, стандартизації та освітніх реформ.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Чернописька Н.В. Еволюція логістики в Україні. *Сучасні проблеми економіки і менеджменту* : тези доп. Міжнар. наук.-практ. конф. Львів : НУ «Львівська політехніка», 2011. С. 136–137.
2. Бакаєв О.О. Теоретичні засади логістики : у 2 т. / О.О. Бакаєв, О.П. Кутах, Л.А. Пономаренко. Київ : Ун-т економіки і технологій транспорту, 2003. Т. 1. 429 с.

3. Кириллова О.В. Теоретичні основи управління роботою флоту у транспортно-технологічних системах : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.01 – Транспортні системи. Одеський національний морський університет. Одеса, 2017. 470 с.
4. Кириллова О.В., Король В.Ю. (Кириллова В.Ю.) Застосування «наукоподібних» слів терміна «логістика» у сфері транспортних технологій: проблема або сучасна тенденція. *Техніка та інфраструктура транспорту* : тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф., 14–16 травня 2018 р. Харків : УкрДУЗТ, 2018. С. 190–193.
5. Король В.Ю. (Кириллова В.Ю.), Кириллова О.В. Експедирування і логістика: термінологічні протиріччя, підміна понять і їх розмежування. *Транспортні системи та технології перевезень* : зб. наук. пр. ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна. Дніпро : ДНУЗТ, 2018. № 15. С. 42–51. DOI: <https://doi.org/10.15802/tst2018/150197>.
6. Купцова А.К. Проблеми формування термінології нових наук (на прикладі логістики) : автореф. дис. ... канд. філол. наук : спец. 10.02.04. Київ, 2007. 17 с.
7. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. Огляд термінологічної проблеми розмежування понять «технологічні» і «логістичні» процеси/операції. 76-а професорсько-викладацька науково-технічна конференція ОНМУ : зб. тез доп., 29–30 травня 2023 р. Одеса : ОНМУ, 2023. 460 с. С. 158–161.
8. Кириллова О.В., Ларіна І.М. Дуальний підхід до розмежування поглядів на сучасний порт і портовий термінал з позицій транспортної науки і логістики. «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» : науковий журнал 2025. Том 36 (75). № 2. Ч. 1. С. 234–242. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/35>.
9. Кириллова О.В., Король В.Ю. (Кириллова В.Ю.) До питання функціональної єдності перевізного і вантажоперевалювального процесів, а також сучасної ролі портів. *Техніка та технології майбутнього '2019* : тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції, 10–11 жовтня 2019, Німеччина. С. 104–111. DOI: 10.30890/2567-5273.2019-09-01-017.

#### REFERENCES

1. Chornopyska, N.V. (2011). Evolution of logistics in Ukraine [Evolutsiia lohistyky v Ukraini]. In *Suchasni problemy ekonomiky i menedzhmentu* (pp. 136–137). Lviv Polytechnic National University.
2. Bakaiev, O.O., Kutakh, O.P., & Ponomarenko, L.A. (2003). *Teoretychni zasady lohistyky* (Vol. 1). University of Economics and Transport Technologies.
3. Kyrylova, O.V. (2017). *Teoretychni osnovy upravlinnia robotoiu flotu u transportno-tekhnolohichnykh systemakh* (Doctoral dissertation). Odesa National Maritime University.

4. Kyryllova, O.V., & Korol, V.Yu. (Kyryllova, V.Yu.) (2018). Use of “quasi-scientific” word-forms of the term “logistics” in transport technologies: A problem or a trend [Zastosuvannia “naukopodibnykh” slovoform termina “lohistyka” u sferi transportnykh tekhnolohii: problema abo suchasna tendentsiia]. In *Tekhnika ta infrastruktura transportu* (pp. 190–193). Ukrainian State University of Railway Transport.
5. Korol, V.Yu. (Kyryllova, V.Yu.), & Kyryllova, O.V. (2018). Forwarding and logistics: Terminological contradictions, substitution of concepts and their differentiation [Ekspedyruvannia i lohistyka: terminolohichni protyrichchia, pidmina poniat i yikh rozmezhuvannia]. *Transport Systems and Technologies of Transportation*. (15). 42–51. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2018/150197>.
6. Kuptsova, A.K. (2007). *Problemy formuvannia terminolohii novykh nauk (na prykladi lohistyky)* (Candidate dissertation abstract). Kyiv.
7. Kyryllova, O.V., & Kyryllova, V.Yu. (2023). Overview of the terminological problem of distinguishing technological and logistical processes/operations [Ohliad terminolohichnoi problemy rozmezhuvannia poniat “tekhnolohichni” i “lohistychni” protsesy/operatsii]. In *76th Scientific and Technical Conference of ONMU* (pp. 158–161). Odesa National Maritime University.
8. Kyryllova, O.V., & Larina, I.M. (2025). Dual approach to modern seaport vs. terminal from transport-science and logistics perspectives [Dualnyi pidkhid do rozmezhuvannia pohliadiv na suchasnyi port i portovyi terminal z pozytsii transportnoi nauky i lohistyky]. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Taurida National University. Technical Sciences*. 36 (75/2/1). 234–242. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/35>.
9. Kyryllova, O.V., & Korol, V.Yu. (Kyryllova, V.Yu.) (2019). On functional unity of transport and cargo-handling processes and the modern role of ports [Do pytannia funktsionalnoi yednosti pereviznoho i vantazhoperevaliuvalnoho protsesiv, a takozh suchasnoi roli portiv]. In *Tekhnika ta tekhnolohii maibutnoho 2019* (pp. 104–111). DOI: <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2019-09-01-017>.

Дата першого надходження статті до видання: 23.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.11.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті: 26.12.2025

**УПРАВЛІННЯ ЕМІСІЄЮ ОКСИДІВ СІРКИ  
ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВА БІОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ,  
ЯКЕ СТАНОВЛЯТЬ ГІДРОВАНІ РОСЛИННІ МАСТИЛА**

**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.** Одним з актуальних завдань, яке виникає під час експлуатації суден морського транспорту, є забезпечення їх екологічності, зокрема щодо емісії оксидів сірки із випускними газами суднових дизелів. Способом розв'язання цього завдання є використання палива біологічного походження, яке становлять гідровані рослинні мастила. Як правило, вміст сірки в подібних сортах палива не перевищує 0,1 % за масою, що дозволяє їх використання або як окремого палива, або (що найчастіше) у складі суміші з паливом нафтового походження.

**Мета** дослідження – визначення можливості управління емісією оксидів сірки з випускними газами суднових дизелів під час використання палива біологічного походження, яке становлять гідровані рослинні мастила.

**Результати.** Дослідження виконувались на суднових середньооберткових дизелях Wartsila 6L32, які під час проведення експериментів експлуатувались на паливах нафтового походження DMA20 (у випадку знаходження судна всередині SECAs) та RMG350 (у випадку знаходження судна поза SECAs). Як альтернативне паливо (визначенню впливу якого на емісію оксидів сірки були присвячені дослідження) використовувалось паливо HVO – Hydrotreated Vegetable Oil, що належить до класу палива біологічного походження, яке становлять гідровані рослинні мастила. Під час досліджень створювались та використовувались у дизелях паливні суміші, які становили 70...80 % палива RMG350 або DMA20 та 30...10 % палива HVO. Як показник, що характеризує екологічність роботи судна за емісією оксидів сірки, приймалося відношення ( $SO_x/CO_2$ ), вимірювання якого забезпечувалось судновою системою діагностики та виконувалось у газовипускній системі дизеля. Для паливних сумішей, які становили 70...90 % палива нафтового походження RMG350 або DMA20 та палива 30...10 % палива HVO в діапазоні експлуатаційних навантажень на дизелі 50...80 %, було встановлено зниження емісії оксидів сірки на 4,43...23,59 % під час знаходження судна поза SECAs та на 8,91...27,21 % під час знаходження судна всередині SECAs.

**Висновки.** Експериментальними дослідженнями, що виконувались на суднових дизелях Wartsila 6L32, підтверджена можливість управління емісією оксидів сірки з випускними газами шляхом використання палива біологічного походження HVO.

**Ключові слова:** екологічні показники, емісія оксидів сірки, морський транспорт, паливо біологічного походження, паливо нафтового походження, 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.** One of the current challenges that arise during the operation of maritime transport vessels is ensuring their environmental friendliness, in particular with regard to the emission of sulfur oxides with exhaust gases from ship diesel engines. The solution to this problem is the use of fuel of biological origin, which consists of hydrogenated vegetable oils. As a rule, the sulfur content in such fuel types does not exceed 0.1 % by weight, which allows their use either as a separate fuel or (most often) in a mixture with fuel of petroleum origin.

**The purpose of the study** is determining the possibility of controlling sulfur oxide emissions from marine diesel engine exhaust gases when using bio-based fuels consisting of hydrogenated vegetable oils.

**Results.** The research was carried out on medium-speed ship diesel engines Wartsila 6L32, which during the experiments were operated on fuels of petroleum origin DMA20 (in the case of the ship being inside SECAs) and RMG350 (in the case of the ship being outside SECAs). As an alternative fuel (the research was devoted to determining the impact of which on the emission of sulfur oxides), HVO fuel was used – Hydrotreated Vegetable Oil, which belongs to the class of fuels of biological origin, which are hydrogenated vegetable oils. During the research, fuel mixtures were created and used in diesel engines, which consisted of 70–80 % RMG350 or DMA20 fuel and 30–10 % HVO fuel. As an indicator characterizing the environmental friendliness of the ship's operation in terms of sulfur oxide emissions, the ratio ( $SO_2/CO_2$ ) was taken, the measurement of which was provided by the ship's diagnostic system and was performed in the diesel exhaust system. For fuel mixtures consisting of 70–90 % petroleum-based fuel RMG350 or DMA20 and 30–10 % HVO fuel, in the range of operating loads on diesel engines of 50–80 %, a reduction in sulfur oxide emissions of 4.43–23.59 % was established when the vessel was outside SECAs and by 8.91–27.21 % when the vessel was inside SECAs.

**Conclusions.** Experimental studies carried out on Wartsila 6L32 marine diesel engines confirmed the possibility of controlling sulfur oxide emissions with exhaust gases by using HVO fuel of biological origin.

**Key words:** biofuels, environmental indicators, marine diesel, maritime transport, petroleum fuels, sulfur oxide emissions.

**Вступ.** Забезпечення екологічності суден морського та внутрішнього водного транспорту є актуальним завданням, на розв'язання якого спрямовані дослідження науковців та технічні рекомендації фірм-виробників суднових дизелів. Головною метою цих досліджень та рекомендацій є зменшення забруднення водного та повітряного середовища під час експлуатації суднових енергетичних установок

та систем, що забезпечують їх функціонування [1; 2]. Самим поширеним типом теплових двигунів, що входять до складу суднових енергетичних установок, є двигуни внутрішнього згоряння (дизелі), які порівняно з іншими тепловими двигунами – паровими чи газовими турбінами – характеризуються більшим ефективним коефіцієнтом корисної дії та меншою питомою витратою палива. Саме ці обставини гарантують домінуюче поширення дизелів на суднах морського та внутрішнього водного транспорту та їх використання як головних та допоміжних двигунів [3; 4].

Отримання ефективної потужності у судових дизелях неможливе без використання палива, кінцевим продуктом життєвого циклу якого є випускні гази, що потрапляють у довкілля та сприяють його забрудненню. Найбільш небезпечними речовинами, що входять до складу випускних газів судових дизелів та негативно впливають на екологічність морських суден, є оксиди азоту  $\text{NO}_x$  та сірки  $\text{SO}_x$ . Саме зі зниженням емісії цих складників пов'язане завдання з підвищення екологічності роботи суден морського та внутрішнього водного транспорту [5; 6].

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Відповідно до вимог Annex VI MARPOL рівень емісії оксидів сірки  $\text{SO}_x$  з випускними газами судових дизелів регламентується вмістом сірки в паливі. Особлива увага щодо емісії оксидів сірки приділяється під час знаходження суден морського та внутрішнього водного транспорту у районах спеціального екологічного контролю – Sulphur emission control area (SECAs). Під час експлуатації суден всередині SECAs максимальний вміст сірки в паливі не повинен перевищувати 0,1 % за масою, в разі експлуатації поза SECAs дозволяється використання палива, вміст сірки у якому не перевищує 0,5 %. Екологічність роботи морських суден щодо емісії оксидів сірки також визначається відношенням  $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)$ , значення якого повинно відповідати вмісту сірки у судовому паливі. Під час знаходження судна всередині SECAs значення відношення  $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)$  не повинно перевищувати 4,3 ppm/%, у випадку експлуатації судна поза SECAs – бути не більш за 21,7 ppm/% [7; 8].

Саме під час знаходження морського судна в цих акваторіях проводився комплекс досліджень з визначення можливості керування емісією оксидів сірки шляхом використання палива біологічного походження, яке становлять гідровані рослини мастила.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Зменшення емісії оксидів сірки  $\text{SO}_x$  з випускними газами судових дизелів досягається двома основними шляхами – через використання спеціальних систем очищення випускних газів та через забезпечення роботи судових дизелів на паливі, вміст сірки в якому не перевищує 0,1 % сірки за масою [9; 10].

Під час використання спеціальних систем очищення (найбільш розповсюдженими з яких є скрубери відкритого чи закритого типу) до потоку випускних газів попадає прісна чи забортна (морська) вода, в якій розчинені спеціальні хімічні речовини [11; 12]. У зв'язку з реакцією цих речовин (як правило, сильних неорганічних основ  $\text{NaOH}$  або  $\text{KOH}$ ) та з'єднань, що містять сірку (здебільшого сірчистої кислоти

$H_2SO_3$  та сірчаної кислоти  $H_2SO_3$ ) утворюються сольові розчини, які додатково розбавляються морською водою та видаляються за борт. При цьому вміст оксидів сірки  $SO_x$  у випускних газах суттєво знижується. Це дозволяє використовувати технології скрубберного очищення в разі експлуатації суднових дизелів на паливі, вміст сірки в якому може досягати 3,5 % за масою [13; 14]. Встановлення скрубберних систем очищення вимагає початкових фінансових витрат на їх встановлення. Ще одним негативним фактором цих систем є збільшення аеродинамічного опору в газопускній системі дизелів. При цьому скрубберні системи дозволяють використання палива із вмістом сірки до 3,5 % за масою, які мають нижчу вартість [15; 16].

Під час використання палива, вміст сірки в якому не перебільшує 0,1 % за масою, судновий дизель та його паливна система заздалегідь переводяться на експлуатаційні режими, що забезпечують ці умови [17; 18]. Тривалість цього переведення може досягати кількох годин та залежить від потужності дизелів та кількості палива із підвищеним вмістом сірки в паливній системі. Здебільшого як такі палива використовуються палива нафтового походження категорії Low-sulfur fuel (із вмістом сірки 0,08...0,1 % за масою), або Ultra-low-sulfur fuel (із вмістом сірки до 0,05 % за масою) [19; 20]. Основним недоліком використання подібних палив є їх більш висока вартість порівняно з паливом, вміст сірки в якому перебуває в межах 0,5 %, та особливо з паливом із вмістом сірки близько 3,5 % (використання якого можливе під час встановлення на дизелях скрубберних систем очищення) [21; 22].

**Формулювання цілей статті.** У зв'язку з вищевикладеним метою дослідження є аналіз можливості управління емісією оксидів сірки шляхом використання палива біологічного походження, яке становлять гідровані рослинні мастила.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження виконувались на спеціалізованому морському судні класу Container Ship, призначеному для транспортування 8480 TEU. Судно здійснювало навігаційні переходи як всередині SECAs, також поза цими районами. До складу допоміжної енергетичної установки якого входили чотири суднових середньооберткових дизелі Wartsila 6L32. Під час проведення експериментів суднові дизелі Wartsila 6L32 експлуатувались на паливах нафтового походження DMA20 (у випадку знаходження судна всередині SECAs) та RMG350 (у випадку знаходження судна поза SECAs). Ці палива використовувались як основні [23; 24]. Як альтернативне паливо (визначенню впливу якого на емісію оксидів сірки були присвячені дослідження) використовувалось паливо HVO – Hydrotreated Vegetable Oil, що належить до класу палива біологічного походження, яке становлять гідровані рослинні мастила [25; 26]. Основні характеристики палив наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристики моторних палив

Характеристика	Марка палива		
	DMA20	RMG350	HVO
Густина при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	874	912	918
В'язкість при 40 °С, мм <sup>2</sup> /с	10,7	342	322
Вміст сірки, %	0,084	0,42	0,018
Нижча теплотворна здатність, кДж/кг	42630	41110	44370

Комплектація паливної системи дизелів відповідала принциповій схемі, що надана на рис. 1, при цьому на такому етапі досліджень як паливо біологічного походження використовувалось паливо класу HVO (рис. 1).

Експлуатація дизелів виконувалась у такий спосіб. Під час знаходження судна поза екологічними районами експлуатація дизелів здійснювалась на паливі RMG350, яке знаходилось у витратному танку 1. Стан палива RMG350 (насамперед його густина, в'язкість та температура) дозволяв його подачу до паливної апаратури дизелів 10, 14, 15, 16. Це забезпечувалось паливним насосом 7 після додаткового очищення палива в паливному фільтрі 4. Кількість одночасно працюючих дизелів визначалась залежно від загального навантаження на суднову електростанцію, при цьому у будь-яких випадках не перевищувало трьох.

Під час знаходження судна в особливих екологічних районах експлуатація дизелів здійснювалась на паливі DMA20, яке знаходилось у витратному танку 2. Вміст сірки в паливі становив 0,084 %, що забезпечувало вимоги Annex VI MARPOL. подача палива DMA20 до дизелів здійснювалась паливним насосом 8 після додаткового очищення його очищення в паливному фільтрі 5.

Крім указаних варіантів, експлуатацію дизелів також можна було виконувати з використанням паливної суміші, до складу якої входило паливо RMG350 або DMA20 та паливо біологічного походження HVO, яке становлять

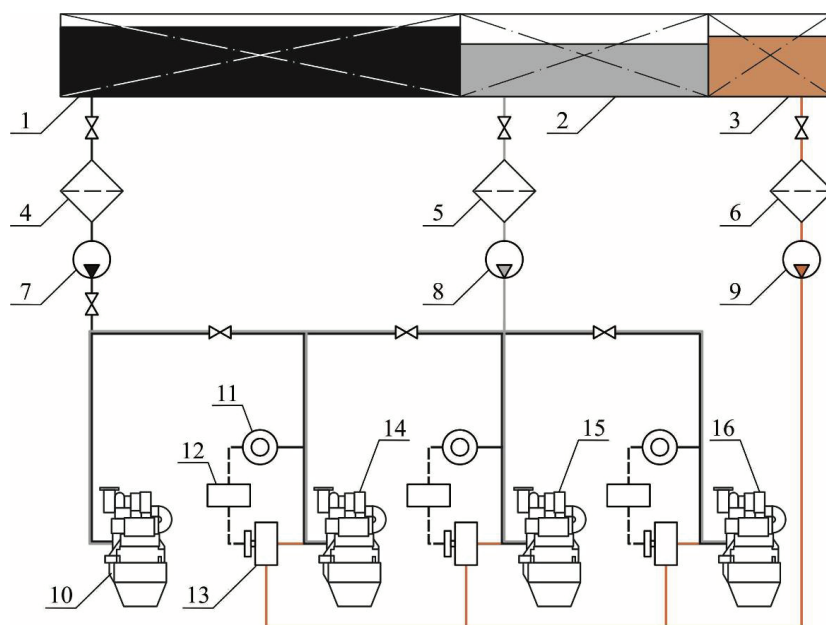


Рис. 1. Принципова паливна схема суднових дизелів Wartsila 6L32: 1 – паливо RMG350; 2 – паливо DMA20; 3 – паливо HVO; 4, 5, 6 – паливні фільтри для палив RMG350, DMA20, HVO відповідно; 7, 8, 9 – паливні насоси для палив RMG350, DMA20, HVO відповідно; 10, 14, 15, 16 – дизелі; 11 – витратомір; 12 – мікроконтролер; 13 – дозатор

гідровані рослинні мастила. При цьому паливні суміші, які становили палива RMG350 та HVO, використовувались під час знаходження судна поза районами SECAs. Паливні суміш з DMA20 та HVO – під час знаходження у SECAs. Подача палива HVO до дизелів здійснювалась паливним насосом 9 після додаткового очищення палива в паливному фільтрі 6. Вміст палива HVO у складі сумішей змінювався в діапазоні 10...30 % за масою. Паливна суміш, що складалась з палива RMG350 або DMA20 та палива біологічного походження HVO, утворювалась шляхом дозування палива HVO у загальний потік палива DM RMG350 або DMA20. Дозування палива біологічного походження HVO забезпечувалось дозатором 13, який встановлювався на магістралі його подачі до кожного з дизелів. Кількість палива біологічного походження HVO у суміші залежало від витрати палива RMG350 або DMA20, яке контролювалось витратоміром 11. Управління роботою дозатора 13 палива біологічного походження HVO забезпечувалось мікроконтролером 12. Використання суміші RMG350 або DMA20 та палива біологічного походження HVO було можливе для дизелів 14, 15, 16. При цьому:

у дизелі 14 використовувалась паливна суміш, яка складалась з 90 % палива нафтового походження RMG350 або DMA20 та 10 % палива біологічного походження HVO;

у дизелі 15 – паливна суміш з 80 % RMG350 або DMA20 та 20 % HVO;

у дизелі 16 – паливна суміш з 70 % RMG350 або DMA20 та 30 % HVO. Саме на цих дизелях виконувались експериментальні дослідження з визначення ефективності використання палива біологічного походження HVO. Дизель 10 експлуатувався виключно на паливі RMG350 або DMA20, без використання паливної суміші, до складу якої входило паливо біологічного походження HVO.

Як показник, за яким оцінювався вплив палива HVO на екологічність роботи морського судна, вибиралось відношення  $\left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)$ . Результати досліджень наведені у таблицях 2, 3 та подані на рис. 2.

Таблиця 2

Відношення  $\left(\frac{SO_2}{CO_2}\right)$ , ppm/%v, під час різних умов експлуатації судових дизелів Wartsila 6L32 та знаходження судна поза SECAs

Навантаження, %	Вид палива			
	RMG350 (100 %)	RMG350 (90 %) + HVO (10 %)	RMG350 (80 %) + HVO (20 %)	RMG350 (70 %) + HVO (30 %)
50	17,83	17,04	16,12	14,38
60	18,24	17,28	16,43	14,56
70	18,82	17,56	16,84	14,72
80	19,67	17,93	17,16	15,03

Таблиця 3

Відношення  $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)$ , ppm/%v, під час різних умов експлуатації суднових дизелів Wartsila 6L32 та знаходження судна всередині SECAs

Навантаження, %	Вид палива			
	DMA20 (100 %)	DMA20 (90 %) + HVO (10 %)	DMA20 (80 %) + HVO (20 %)	DMA20 (70 %) + HVO (30 %)
50	3,48	3,17	2,95	2,72
60	3,72	3,38	3,12	2,88
70	3,93	3,56	3,28	3,02
80	4,08	3,67	3,32	2,97

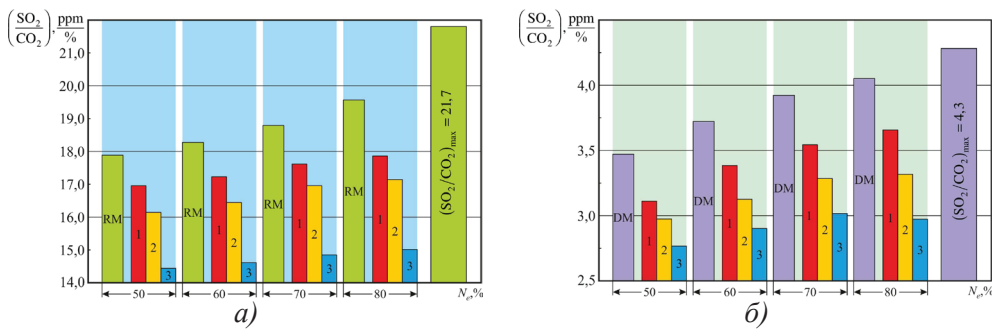


Рис. 2. Відношення  $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)$ , ppm/%v, під час різних умов експлуатації суднових дизелів Wartsila 6L32:  
а – під час використання палива RMG350 та його суміші з паливом HVO;  
б – під час використання палива DMA20 та його суміші з паливом HVO;  
RM – паливо RMG350; DM – паливо DMA20; 1, 2, 3 – суміш палива RMG350 (або DMA20) та 10 %, 20 %, 30 % палива HVO відповідно

Відносне зменшення емісії SO<sub>x</sub> під час використання палива біологічного походження, яке становлять гідровані рослинні мастила розраховується як

$$\Delta\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right) = \frac{\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{RMG}} - \left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{HVO}}}{\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{RMG}}} \cdot 100\%, \text{ або}$$

$$\Delta\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right) = \frac{\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{DMA}} - \left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{HVO}}}{\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{DMA}}} \cdot 100\%;$$

де  $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{RMG}}$ ,  $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{DMA}}$  – значення відношення  $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)$  під час використання палива RMG350 або DMA20;

$\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{HVO}}$  – значення відношення  $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)$  під час використання суміші палива

RMG350 або DMA20 та HVO [27].

За наведеним виразом з урахуванням значень таблиць 2, 3 отримані величини відносного зменшення емісії  $\text{SO}_x$  під час використання палива біологічного походження, які узагальнені у таблицях 4, 5.

Екологічна стійкість за емісією  $\text{SO}_x$  під час використання палива біологічного походження, яке становлять гідровані рослинні мастила, може бути оцінена за виразом:

$$\Delta\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)^+ = \frac{\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{VI}} - \left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{HVO}}}{\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{VI}}} \cdot 100\%;$$

в якому  $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)_{\text{VI}}$  – значення відношення  $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)$  відповідно до вимог Annex VI

MARPOL (21,7 ppm/%v під час знаходження поза SECAs та 4,3 ppm/%v під час знаходження всередині SECAs) [28; 29].

Розрахункові значення, що отримані за наведеними виразами з урахуванням даних таблиць 4, 5, наведені у таблицях 6, 7.

Таблиця 4

**Відносне зменшення емісії  $\text{SO}_x$ , %, під час різних умов експлуатації суднових дизелів Wartsila 6L32 та знаходження судна поза SECAs**

Навантаження, %	Вид палива		
	RMG350 (90 %) + HVO (10 %)	RMG350 (80 %) + HVO (20 %)	RMG350 (70 %) + HVO (30 %)
50	4,43	9,59	19,35
60	5,26	9,92	20,18
70	6,70	10,52	21,79
80	8,85	12,76	23,59

Таблиця 5

**Відносне зменшення емісії  $\text{SO}_x$ , %, під час різних умов експлуатації суднових дизелів Wartsila 6L32 та знаходження судна всередині SECAs**

Навантаження, %	Вид палива		
	DMA20 (90 %) + HVO (10 %)	DMA20 (80 %) + HVO (20 %)	DMA20 (70 %) + HVO (30 %)
50	8,91	15,23	21,84
60	9,14	16,13	22,58
70	9,41	16,54	23,16
80	10,05	18,63	27,21

За даними таблиць 6, 7 побудовані діаграми, що наведені на рис. 3.

Таблиця 6

Екологічна стійкість  $\Delta \left( \frac{SO_2}{CO_2} \right)^+$  за емісією  $SO_x$ , %, під час різних умов експлуатації суднових дизелів Wartsila 6L32 та знаходження судна поза SECAs

Навантаження, %	Вид палива			
	RMG350 (100 %)	RMG350 (90 %) + HVO (10 %)	RMG350 (80 %) + HVO (20 %)	RMG350 (70 %) + HVO (30 %)
50	17,83	21,47	25,71	33,73
60	15,94	20,37	24,29	32,90
70	13,27	19,08	22,40	32,17
80	9,35	17,37	20,92	30,74

Таблиця 7

Екологічна стійкість  $\Delta \left( \frac{SO_2}{CO_2} \right)^+$  за емісією  $SO_x$ , %, під час різних умов експлуатації суднових дизелів Wartsila 6L32 та знаходження судна всередині SECAs

Навантаження, %	Вид палива			
	DMA20 (100 %)	DMA20 (90 %) + HVO (10 %)	DMA20 (80 %) + HVO (20 %)	DMA20 (70 %) + HVO (30 %)
50	19,07	26,28	31,40	36,74
60	13,49	21,40	27,44	33,02
70	8,60	17,21	23,72	29,77
80	5,12	14,65	22,79	30,93

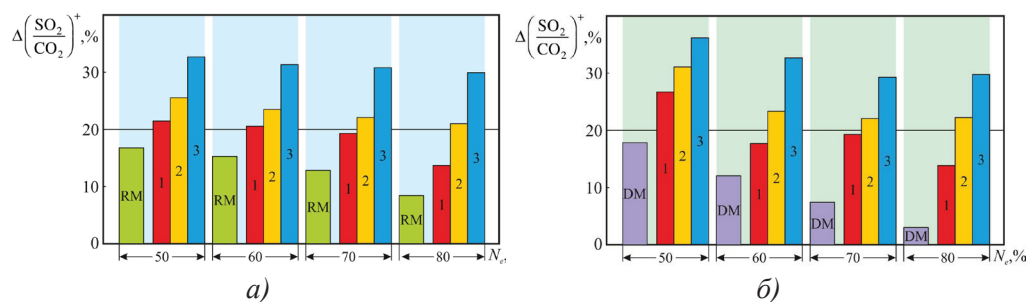


Рис. 3. Екологічна стійкість  $\Delta \left( \frac{SO_2}{CO_2} \right)^+$  за емісією  $SO_x$ , %, під час різних умов

експлуатації суднових дизелів Wartsila 6L32:

а – під час використання палива RMG350 та його суміші з паливом HVO;

б – під час використання палива DMA20 та його суміші з паливом HVO;

RM – паливо RMG350; DM – паливо DMA20; 1, 2, 3 – суміші палива RMG350 (або DMA20) та 10 %, 20 %, 30 % палива HVO відповідно

**Висновки.** Експериментальними дослідженнями, що виконувались на суднових дизелях Wartsila 6L32, підтвердили можливість управління емісією оксидів

сірки з випускними газами шляхом використання палива біологічного походження HVO.

Для паливних сумішей, які становили 70...90 % палива нафтового походження RMG350 або DMA20 та палива 30...10 % палива HVO в діапазоні експлуатаційних навантажень на дизелі 50...80 %, було встановлено зниження емісії оксидів сірки на 4,43...23,59 % під час знаходження судна поза SECAs та на 8,91...27,21 % під час знаходження судна всередині SECAs.

У разі використання лише палива нафтового походження RMG350 або DMA20 екологічна стійкість морських суден за емісією  $SO_x$  перебуває в межах 9,35...17,83 % та 5,12...19,07 % відповідно. Використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження HVO, яке становлять гідровані рослинні мастила, збільшує екологічну стійкість морських суден за емісією  $SO_x$ . Значення цього показника для різного складу паливної суміші та різного навантаження на дизелі досягає значень 17,37...33,73 % під час знаходження судна поза SECAs та використання палива RMG350, а також 14,65...36,74 % під час знаходження судна всередині SECAs та використання палива DMA20.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. 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. 12. 1440. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.
2. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами судових дизелів. *Водний транспорт* : збірник наукових праць. 2024. Вип. 2(40). С. 173–185. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16>.
3. Petrychenko O., Levinskyi M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport. *Sustainability*. 2025. V. 17. P. 2141. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
4. Varbanets R., Fomin O., Píštěk 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.
5. Sagin S., Kuropyatnyk O. Determination of optimal operating modes of the selective catalytic reduction system for marine diesel exhaust gases. *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. № 5(3(85)). P. 12–22. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.340411>.
6. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 40. С. 49–54. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf340.2020.49-54>.
7. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економичності дизелів морських та річкових засобів транспорту. *Суднові*

- енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2023. Вип. 46. С. 118–131. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf46.2023.118-131>.
8. Sagin S., Kuropyatnyk O., Rusnak D. Improvement of the process of cleaning exhaust gases of marine diesels from sulfur oxides. *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. № 4 (1 (84)). P. 72–79. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.337616>.
  9. 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: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-2>.
  10. Kuropyatnyk O.A. Reduction of NO<sub>x</sub> emission in the exhaust gases of low-speed marine diesel engines. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, Vienna, 2018. № 7–8. P. 37–42. DOI: <https://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. № 7–8. P. 14–17. DOI: <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
  12. 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: <https://doi.org/10.31653/smf47.2023.122-130>.
  13. Zablotskyi Yu.V., Sagin A.S. Applying of fuel additives in marine diesel engines. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2021. Вип. 43. С. 5–17. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf343.2021.5-17>.
  14. 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. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
  15. Сагін С.В., Побережний Р.В. Аналіз основних способів зниження емісії оксидів азоту дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2022. Вип. 44. С. 132–141. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf44.2022.132-141>.
  16. Заблоцький Ю.В. Підвищення економічності роботи суднових дизелів. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 40. С. 12–16. <https://doi.org/10.31653/smf340.2020.12-16>.
  17. Заблоцький Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок. *Вісник Одеського національного морського університету* : збірник наукових праць. 2020. № 2 (62). С. 106–119. DOI: <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2020-1-106-119>.
  18. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний

- збірник. 2020. Вип. 41. С. 10–14. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf341.2020.10-14>.
19. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 41. С. 5–9. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf340.2020.5-9>.
  20. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін А.С. Робота судового дизеля на біодизельному паливі. *Автоматизація судових технічних засобів* : науково-технічний збірник. 2021. Вип. 27. С. 93–107. DOI: <https://doi.org/10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107>.
  21. 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>.
  22. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін С.С., Чимшир В.І., Разінкін Р.О. Аналіз екологічної стійкості та енергетичної ефективності використання скрубного очищення випускних газів дизелів суден морського транспорту. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2023. Вип. 47. С. 157–171. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf47.2023.157-171>.
  23. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка судових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками. *Автоматизація судових технічних засобів* : науково-технічний збірник. 2021. Вип. 27. С. 108–119.
  24. Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури судових дизелів. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2022. Вип. 44. С. 121–131. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf44.2022.121-131>.
  25. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 41. С. 20–25. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf341.2020.20-25>.
  26. 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: <https://doi.org/10.31653/smf46.2023.101-109>.
  27. 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. № 7–8. P. 36–43. DOI: <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
  28. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів експлуатації судових двигунів внутрішнього згорання під час використання біодизельного палива. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2024. Вип. 48. С. 100–113. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf48.2024.100-113>.

29. Sagin S., Chymshyr V., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Madey V., Rusnak D. Using Ultrasonic Fuel Treatment Technology to Reduce Sulfur Oxide Emissions from Marine Diesel Exhaust Gases. *Energies*. 2025. Vol. 18 (17). P. 4756. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18174756>.

#### REFERENCES

1. 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. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.
2. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. (2024). Vznachennya optimalnih rezhimiv procesiv upravlinnya vipusknimi gazami sudnovih duzeliv. *Water transport*. 2 (40). 173–185. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16>.
3. Petrychenko, O., Levinskyi, M., Goolak, S., Lukoševičius, V. (2025). Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport. *Sustainability*. 17. 2141. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
4. Varbanets, R., Fomin, O., Pištek, 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.
5. Sagin, S., Kuropyatnyk, O. (2025). Determination of optimal operating modes of the selective catalytic reduction system for marine diesel exhaust gases. *Technology Audit and Production Reserves*. 5 (3 (85)). 12–22. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.340411>.
6. Rusnak, D.Y., Sagin, S.V. (2020). Zabezpechennya ekologichnich vumog pri ultrazvukovii desulphurizacii vuglevodnich paliv. *Ship power plants*. 40. 49–54. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf340.2020.49-54>.
7. Sagin, S.V., Sagin, A.S. (2023). Control ta diagnostuvannya nadiinosti ta ekonomichnosti dizeliv morskih ta richkovih zasobiv transportu. *Ship power plants*. 46. 118–131. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf46.2023.118-131>.
8. Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Rusnak, D. (2025). Improvement of the process of cleaning exhaust gases of marine diesels from sulfur oxides. *Technology Audit and Production Reserves*. 4 (1 (84)). 72–79. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.337616>.
9. 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: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-2>.
10. Kuropyatnyk, O.A. (2018). Reduction of NO<sub>x</sub> 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. DOI: <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
12. Sagin, S.V., Suvorov, P.S., Bondar, S.A. (2023). Rozrobka metodu ocinki rizikiv vineknennya avariynih podii pid chas eksplyataciyi dizeliv morskih suden. *Ship power plants*. 47. 122–130. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf47.2023.122-130>.
  13. Zablotskyi, Yu.V., Sagin, A.S. (2021). Applying of fuel additives in marine diesel engines. *Ship power plants*. 43. 5–17. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf343.2021.5-17>.
  14. 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. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
  15. Sagin, S.V., Poberezhniy, R.V. (2022). Analiz osnovnich sposobiv znizhennya emisii oksidiv azotu dizeliv suden morskogo ta vnutrishnego vodnogo transportu. *Ship power plants*. 44. 132–141. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf44.2022.132-141>.
  16. Zablotskyi, Yu.V. (2020). Pidvishennya ekonomichnosti roboti sudnovih dizeliv. *Ship power plants*. 40. 12–16. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf340.2020.12-16>.
  17. Zablotskyi, Yu.V. (2020). Pidvishennya palivnoi ekonomichnosti sudnovih dizelnih ustanovok. *Visnik Odeskogo nacionalnogo morskogo universytetu*. 2. 106–119. DOI: <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2020-1-106-119>.
  18. Marchenko, O.O., Sagin, S.V. (2020). Vdoskonalennya procesu ochishennya sudnovih vazhkih paliv. *Ship power plants*. 41. 10–14. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf341.2020.10-14>.
  19. Poberezhniy, R.V., Sagin, S.V. (2020). Zabezpechennya ekologichnykh pokaznikiv dizeliv suden richkovogo ta morskogo transportu. *Ship power plants*. 41. 5–9. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf340.2020.5-9>.
  20. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, A.S. (2021). Robota sudnovogo dizelya na biodizelnomu palivi. *Automation of ship technical facilities*. 27. 93–107. DOI: <https://doi.org/10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107>.
  21. 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>.
  22. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, S.S., Chimshir, V.I., Razinkin, R.O. (2023). Analiz ekologichnoi stiicosti ta energetichnoi effektivnosti vicoristannya scrubernogo ochishennya vipusknich gaziv dizeliv sudden morskogo transportu. *Ship power plants*. 47. 157–171. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf47.2023.157-171>.
  23. Sagin, S.V., Stolyaryk, T.O. (2021). Dinamika sudnovih dizeliv pid chas vikoristannya motornich mastil z riznimi structurnimi karakteristikami. *Automation of ship technical facilities*. 27. 108–119. DOI: <https://doi.org/10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119>.

24. Zablotskyi, Yu.V., Sagin, A.S. (2022). Vznachennya dunamichnih navantazhen pid chas zmini rezhimiv mashchennya preciziinich par palivnoi aparaturi sudnovih diziliv. *Ship power plants*. 44. 121–131. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf44.2022.121-131>.
25. Zverkov, D.O., Sagin, S.V. (2020). Znizhennya mechanichnich vtrat u sudnovich dizelyach. *Ship power plants*. 41. 20–25. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf341.2020.20-25>.
26. Sagin, S.V., Bondar, S.A. (2023). Metod poperedzhennya avariinich situacii pid chas ekspluatacii sudnovih dizeliv za analizom potocu vidmov iogo osnovnih vuzliv. *Ship power plants*. 46. 101–109. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf46.2023.101-109>.
27. 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. DOI: <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
28. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. (2024). Vznachennya optimalnih rezhimiv ekspluatacii sudnovih dviguniv vnutrashnogo zgoryannya pid chas vikoristannya biodizelnogo paliva. *Ship power plants*. 48. 100–113. DOI: <https://doi.org/10.31653/smf48.2024.100-113>.
29. Sagin, S., Chymshyr, V., Karianskyi, S., Kuropyatnyk, O., Madey, V., Rusnak, D. (2025). Using Ultrasonic Fuel Treatment Technology to Reduce Sulfur Oxide Emissions from Marine Diesel Exhaust Gases. *Energies*. 18 (17). 4756. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18174756>.

Дата першого надходження статті до видання: 23.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.11.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті: 26.12.2025

## ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ЗА АНАЛІЗОМ МОТОРНОЇ ОЛИВИ

**Р.О. Разінкін**

старший викладач кафедри інженерних дисциплін,  
Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»,  
Ізмаїл, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-5817-7445

### **Анотація**

**Вступ.** Експлуатаційна надійність та функціонування двигунів внутрішнього згоряння неможливі без суднових систем, однією з яких є система мащення. Ефективність та надійність систем мащення визначаються характеристиками моторної оливи, які змінюються під час експлуатації дизеля. Дисперсний стан та наявність органічних або неорганічних домішок у оливі також характеризують стан його контактних вузлів – циліндрових втулок, поршневих кілець, вкладишів підшипника. Контроль та аналіз моторної оливи систем мащення (як циркуляційних, так і циліндрових) є одними з компонентів діагностування технічного стану суднових дизелів.

**Мета** дослідження – визначення можливості діагностування технічного стану суднових дизелів за аналізом експлуатаційних характеристик моторної оливи.

**Результати.** Дослідження виконувались на двох чотиритактних суднових дизелях 6R26 Wartsila, мащення циліндрової групи та колінчатого вала яких забезпечувалось загальною циркуляційною системою, в якій використовувалась моторна олива Castrol 15W20.

Під час експлуатації суднових дизелів поступово погіршуються характеристики моторної оливи, що використовується у системі циркуляційного мащення. Підтвердженням цього є зменшення загального лужного числа оливи (Total Base Number – TBN). Протягом експерименту загальне лужне число судової моторної оливи Castrol 15W20 з початковим значенням  $TBN = 14,0$  мгКОН/г за 1000 годин експлуатації знизилось до  $TBN = 10,3...11,2$  мгКОН/г. При цьому під час відбору проб (які виконувались кожні 200 годин експлуатації дизеля) спостерігались його як поступові, так і стрибкоподібні зміни.

Більш інформаційним параметром діагностування технічного стану трибосполучень суднових дизелів є швидкість зміни загального лужного числа  $V_{TBN}$  за певний проміжок часу.

Найбільш інформативним способом діагностування технічного стану трибосполучень суднових дизелів є спектральний аналіз моторної оливи, який дозволяє визначити вміст у оливі елементів, що характеризують знос контактних поверхонь дизеля – Wear Elements та елементів, що характеризують забруднення оливи – Contaminant Elements. Обмеженням цього методу є необхідність його проведення виключно у берегових дослідницьких лабораторіях, що збільшує інтервал інформативності та пропорційно цьому підвищує час прийняття рішень щодо зміни умов експлуатації дизеля.

**Висновки.** Через збіг динаміки зміни *Wear Elements / Contaminant Elements* та швидкості зміни загального лужного числа  $V_{TBN}$  саме швидкість зміни загального лужного рекомендується як параметр, за яким доцільно виконувати експрес-діагностику технічного стану трибосполучень дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту.

**Ключові слова:** діагностування технічного стану, загальне лужне число, морський транспорт, моторна олива, судновий дизель, трибосполучення суднових дизелів, циркуляційна система мащення.

## DIAGNOSTICS OF THE TECHNICAL CONDITION OF MARINE DIESEL ENGINES BY ANALYSIS OF ENGINE OIL

**R.O. Razinkin**

Senior Lecturer of the Department of Engineering Disciplines,  
Danube Institute of National University Odesa Maritime Academy, Izmail, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-5817-7445

### Summary

**Introduction.** Operational reliability and functioning of internal combustion engines is impossible without ship systems, one of which is the lubrication system. The effectiveness and reliability of lubrication systems is determined by the characteristics of engine oil, which change during the operation of the diesel engine. The dispersed state and the presence of organic or inorganic impurities in the oil also characterize the condition of its contact nodes – cylinder liners, piston rings, bearing inserts. Control and analysis of engine oil of lubrication systems (both circulating and cylinder) is one of the components of diagnosing the technical condition of ship diesel engines.

**The purpose of the study** – determining the possibility of diagnosing the technical condition of marine diesel engines by analyzing the operational characteristics of motor oil.

**Results.** The research was carried out on two four-stroke marine diesel engines 6R26 Wartsila, the lubrication of the cylinder group and crankshaft of which was provided by a general circulation system in which Castrol 15W20 engine oil was used.

During the operation of marine diesel engines, the characteristics of the engine oil used in the circulation lubrication system gradually deteriorate. This is confirmed by the decrease in the total base number TBN. The total base number of the Castrol 15W20 marine engine oil with an initial value of  $TBN = 14.0$  mgKOH/g decreased to  $TBN = 10.3–11.2$  mgKOH/g after 1000 hours of operation. At the same time, during sampling (which was carried out every 200 hours of diesel engine operation), both gradual and abrupt changes were observed.

A more informative parameter for diagnosing the technical condition of tribocompounds of marine diesel engines is the rate of change of the total alkaline number  $V_{TBN}$  over a certain period of time.

The most informative method for diagnosing the technical condition of tribocompounds of marine diesel engines is spectral analysis of motor oil, which allows determining the content of elements in the oil that characterize the wear of the contact surfaces of the diesel engine – *Wear Elements*, and elements that characterize

*the contamination of the oil – Contaminant Elements. The limitation of this method is the need to carry it out exclusively in shore research laboratories, which increases the interval of informativeness and proportionally increases the time for making decisions on changing the operating conditions of the diesel engine.*

**Conclusions.** *Due to the coincidence of the dynamics of change of Wear Elements / Contaminant Elements and the rate of change of the total alkaline number  $V_{TBN}$  it is the rate of change of the total alkaline number that is recommended as a parameter by which to perform express diagnostics of the technical condition of diesel engine tribo-combinations of marine and inland waterway transport vessels.*

**Key words:** *circulating lubrication system, diagnostics of technical condition, marine diesel, marine transport, motor oil, total alkaline number, tribocoupling of marine diesel engines.*

**Вступ.** Двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) є найбільш поширеним типом теплових двигунів, що використовуються на суднах морського транспорту. ДВЗ/дизелі встановлюються на суднах усіх класів та призначення та виконують функції як головних, так і допоміжних двигунів. При цьому їх ефективна потужність перетворюється на механічну енергію та використовується для забезпечення руху судна, а також трансформується в електричну енергію, яка необхідна для забезпечення функціонування судових систем, механізмів та обладнання [1; 2]. Водночас з цим експлуатаційна надійність та функціонування ДВЗ неможливі без судових систем, які забезпечують мащення та охолодження його основних вузлів, подачу палива та повітря, відведення випускних газів, автоматичне регулювання та підтримання швидкісних режимів [3; 4]. Однією із систем, що забезпечує перелічені функції, є система мащення, яка забезпечує подачу оливи до деталей циліндропоршневої групи (циліндрової втулки та поршневих кілець), а також колінчатого валу та поєднаних з ним деталей руху (підшипників, шатуна та крейцкопфу) [5; 6].

Залежно від конструкційних особливостей ДВЗ мащення їх контактних вузлів та поверхонь забезпечується двома – циркуляційною та циліндровою (лубрикаторною), або однією – лише циркуляційною системами мащення. Перша схема (з двома системами мащення) реалізується у судових двотактних дизелях. У цих дизелях циліндрова (лубрикаторна) система забезпечує подачу оливи на дзеркало циліндрової втулки шляхом його впорскування лубрикатором, циркуляційна – за допомогою циркуляційного насоса подає оливу до колінчатого валу та його підшипників ковзання. Мащення чотиритактних дизелів забезпечується однією загальною системою, в якій циркуляційний насос нагнітає оливу до трибосполучень колінчатий вал – вкладиш підшипника, а мащення деталей циліндрової групи здійснюється через розбризкування та аеродинамічний рух оливи [7; 8]. Ефективність та надійність систем мащення визначається характеристиками моторної оливи, які змінюються під час експлуатації дизеля. Дисперсний стан та наявність органічних або неорганічних домішок у оливі також характеризує стан його контактних вузлів – циліндрових втулок, поршневих кілець, вкладишів підшипника. Контроль та аналіз моторної оливи систем мащення (як циркуляційних, так і циліндрових) є одним з компонентів діагностування технічного стану судових дизелів [9; 10].

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Забезпечення якісного мащення трибосполучень суднових дизелів є однією з важливих та актуальних проблем, яка вимагає свого розв'язання під час експлуатації дизелів суден морського транспорту [11; 12]. Навіть короткочасна відсутність плівки оливи між поверхнями тертя або її пошкодження чи руйнування призводить до стрибкоподібного зростання контактних взаємодій, що може стати причиною підвищеного зносу, поломки деталей та аварійної зупинки дизеля. Подібні негативні явища можуть виникати під час мащення як колінчатого валу та підшипників ковзання, так і під час мащення циліндрової втулки та поршневих кілець [13; 14]. Через це виникає практичне завдання, яке полягає у забезпеченні якісного процесу мащення контактних вузлів суднових дизелів. При цьому під поняттям «якісне мащення» розуміють таке, за яким забезпечується мінімальний знос контактних поверхонь та найбільш тривалий час підтримання експлуатаційних показників оливи. Визначення цих показників можливе шляхом контролю стану оливи, яка потрапляє до підпоршневого простору дизелю (для циліндрових систем мащення двотактних дизелів) або до картеру дизелю (для циркуляційних систем мащення чотиритактних дизелів) [15; 16].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема забезпечення якісного мащення деталей суднових дизелів розв'язується з моменту їх широкого розповсюдження та використання на судах морського та внутрішнього водного транспорту. Найбільш гострою вона ставала під час впровадження у суднових ДВЗ палива з підвищеним вмістом сірки (до 3,5 % за масою) та збільшення ступеня наддуву (більш за 3,0...3,5) [17; 18]. Саме за цих умов у циліндрових системах мащення суднових двотактних дизелів використовувалась лубрикаторна олива з підвищеним вмістом лужних речовин, а саме гідроксиду калію КОН. Загальне лужне число (Total Base Number – TBN) цих олів досягало 70...100, що відповідало вмісту КОН в оліві на рівні 70...100 мг КОН/г оливи [19; 20]. Поступове зниження вмісту сірки в паливі до 0,5 % та 0,1 % за масою (відповідно до вимог Annex VI MARPOL) сприяло зниженню TBN для моторних олів, що використовуються у системах циліндрового/лубрикаторного мащення суднових дизелів [21–23]. Одночасно з цим у суднових чотиритактних дизелях почали використовуватися палива з підвищеною в'язкістю – такі, що відповідають значенням IFO180 та згодом IFO350. Це призвело до необхідності використання в циркуляційних системах мащення цих дизелів моторних олів класу TBN30 та TBN40 з відповідним вмістом КОН в оліві – 30 КОН/г оливи та 40 мг КОН/г оливи [24; 25]. При цьому у всіх випадках основним критерієм, що характеризує перебіг процесу мащення, визнавалися вміст механічних домішок та зміна TBN оливи протягом часу. Одночасно з цим слід визначити, що перебіг процесу мащення може бути оцінений за інтенсивністю (швидкістю) зміни цих величин. При цьому швидкість зміни вмісту механічних домішок у оліві та зміна TBN оливи протягом часу як показники, за якими можна виконувати діагностування технічного стану суднових дизелів та їх контактних вузлів, не є поширеним методом, тому вимагає уваги та дослідження.

**Формулювання цілей статті.** У зв'язку з вищевикладеним метою дослідження є визначення можливості діагностування технічного стану суднових дизелів за аналізом експлуатаційних характеристик моторної оливи, а саме швидкості зміни його загального лужного числа – TBN.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження виконувались на двох чотиритактних судових дизелях 6R26 Wartsila, мащення циліндрової групи та колінчатого вала яких забезпечувалось загальною циркуляційною системою, в якій використовувалась моторна олива Castrol 15W20. Серед основних функціональних характеристик якої визначимо: кінематичну в'язкість за 100°C – 15,2 сСт, Total Base Number – 14,0 мгКОН/г.

Дослідження складались з двох етапів. Перший виконувався безпосередньо на судні на полягав у визначенні значення TBN моторної оливи після кожних 100 годин експлуатації дизелів. Другий етап полягав у надсиланні проб моторної оливи, що були відібрані за такі самі проміжки часу, як і на першому етапі, до берегової дослідницької лабораторії. Надалі саме у ній виконувався спектральний аналіз моторної оливи з метою визначення вмісту металевих та інших домішок. Усі технологічні процедури, що пов'язані з виконанням першого етапу, а також статистична обробка та аналіз отриманих результатів як першого, так і другого етапу виконувались автором дослідження самостійно.

Спектральний аналіз моторної оливи, що виконується у берегових дослідницьких лабораторіях та є обов'язковою технологічною процедурою під час експлуатації дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту, забезпечує визначення багатьох компонентів, що потрапляють у моторну оливу у результаті згоряння палива та контактної взаємодії трибосполучень дизеля. Недоліком спектрального аналізу є певна затримка в отриманні його результатів, що пов'язана з логістичним ланцюжком судно – дослідницька лабораторія (яким моторна олива відправляється із судна на дослідження), немиттєвим проведенням аналізу (через великий обсяг подібних досліджень) та можливістю порушення зворотного зв'язку між дослідницькою лабораторією та морським судном (що, наприклад, може бути зумовлене особливостями навігаційного переходу). На жаль, це може бути причиною несвоєчасного прийняття рішення з управління режимами мащення судових дизелів та оцінки технічного стану його трибосполучень (насамперед поршневі кільця – втулка циліндра та вкладиш підшипника – колінчатий вал).

Через це як додатковий критерій, за яким можна виконувати діагностику технічного стану судових дизелів, була запропонована швидкість зміни загального лужного числа оливи VTBN, яка визначалась за виразом

$$V_{\text{TBN}} = \frac{\text{TBN}_{n-1} - \text{TBN}_n}{t_n - t_{n-1}} \cdot 100;$$

де:  $\text{TBN}_n$ ,  $\text{TBN}_{n-1}$  – значення TBN у будь-який та у попередній до нього час вимірювання;

$t_n$ ,  $t_{n-1}$  – поточний (в який виконується вимірювання) та попередній час визначення TBN. Через невелике значення  $V_{\text{TBN}}$  з метою кращої візуалізації цієї величини до наведеного виразу додатково введено співмножник 100.

Результати досліджень наведені на рис. 1–3 (додатково визначимо, що їх обробка та аналіз виконувались автором дослідження). При цьому на рис. 1 разом зі значеннями TBN (яке вимірювалось для обох дизелів) наведені значення швидкості його зміни  $V_{\text{TBN}}$ .

На наш погляд, саме швидкості зміни загального лужного оливи є показником, за яким можна виконувати діагностику стрибкоподібної зміни технічного стану трибосполучень суднового дизеля. Значення загального лужного числа характеризує лише можливість подальшого використання певного об'єму моторної оливи, що знаходиться у системі мащення, та не надає додаткової інформації щодо процесу його окислення чи забруднення сторонніми компонентами. Підтвердженням цього припущення є аналіз відповідності зміни  $V_{\text{TBN}}$  (яка розраховувалась за результатами аналізу моторної оливи у судновій лабораторії) та спектральний аналіз забруднень, що входять до складу оливи (який виконувався у береговій дослідницькій лабораторії).

На рис. 2, 3 як основні результати спектрального аналізу моторної оливи, що виконувався у береговій дослідницькій лабораторії, наведені значення вмісту в оливі таких речовин: Al, Cr, Cu, Fe, Sn, Pb, які характеризують знос контактних поверхонь дизеля та належать до категорії Wear Elements; а також B, Na, Si, V, Mo, Ni, які характеризують забруднення моторної оливи та належать до категорії Contaminant Elements. Зазначимо, що компоненти Al, Cr, Cu, Fe, Sn, Pb є складниками, що входять до матеріалів, з яких виготовляються поршневі кільця, втулки, та до антифрикційних багат шарових покриттів вкладишів підшипників. Через це за їх зміною можна діагностувати технічний стан цих поверхонь.

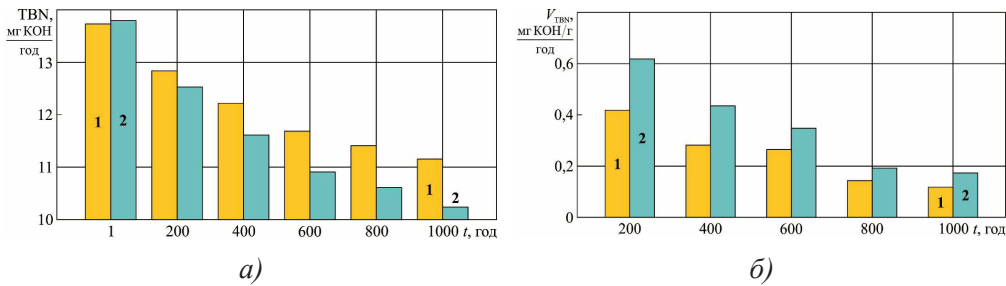


Рис. 1. Зміна характеристик моторної оливи Castrol 15W20 під час експлуатації суднових дизелів 6R26 Wartsila: 1 – дизель № 1; 2 – дизель № 2; а – TBN; б – VTBN

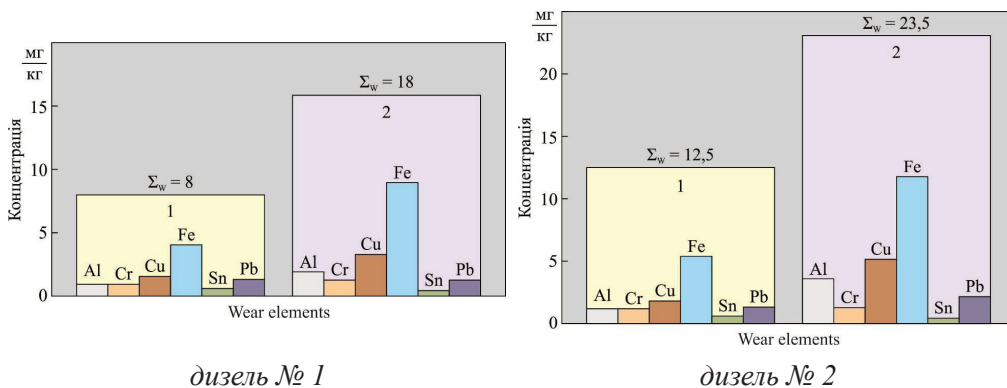
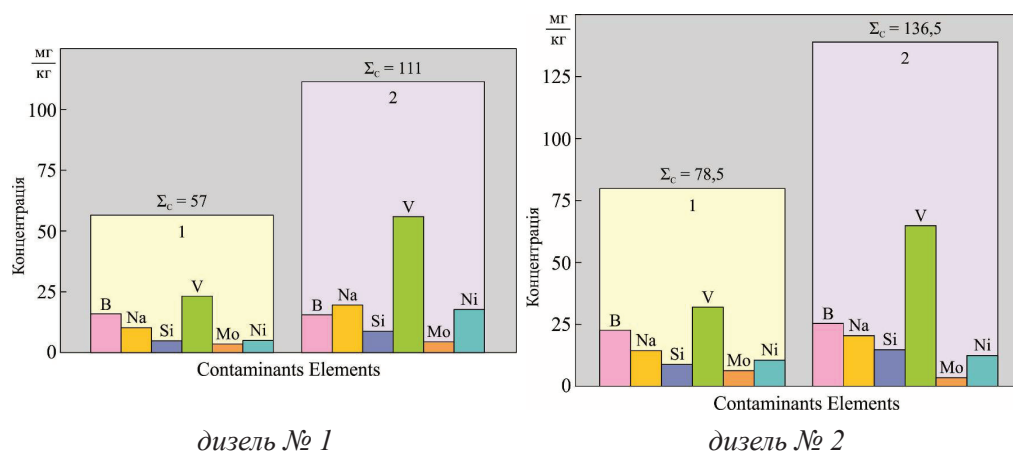


Рис. 2. Вміст механічних домішок у моторній оливі Castrol 15W20 під час експлуатації в циркуляційній системі мащення суднових дизелів 6R26 Wartsila: 1 – після 500 годин; 2 – після 1000 годин



дизель № 1  
дизель № 2  
Рис. 3. Вміст забруднюючих домішок у моторній оливі Castrol 15W20 під час експлуатації в циркуляційній системі мащення суднових дизелів 6R26 Wartsila: 1 – після 500 годин; 2 – після 1000 годин

Зіставлення результатів з визначення швидкості зміни загального лужного числа оливи  $V_{TBN}$  та концентрації в оливі компонентів, що характеризують знос основних трибосполучень дизеля та потрапляння в оливу забруднюючих компонентів, дозволяє зробити висновок щодо їх взаємозв'язку та можливості діагностування стану судового дизеля за аналізом моторної оливи.

Інструкції та рекомендації фірм-виробників дизелів регламентують лише гранично допустимий вміст у моторній оливі показників, що характеризують знос його елементів. Саме за цими значеннями оцінюється технічний стан дизеля. Проте через аналіз швидкості зміни загального лужного числа оливи  $V_{TBN}$  можна діагностувати виникнення несправностей, пов'язаних зі зміною технічного стану елементів дизеля, наприклад, підвищеного зносу поршневих кілець (що може призвести до їх поломки), видаленню антифрикційного матеріалу з поверхонь вкладишів підшипників (що може призвести до збільшення механічних напружень та зайвих механічних втрат).

Під час дослідження контролювались та підтримувались у рекомендованому фірмою-виробником діапазоні всі основні показники роботи дизелів 6R26 Wartsila та систем, що забезпечують їх функціонування.

**Висновки.** Експлуатація судових дизелів нерозривно пов'язана зі зміною технічного стану їх основних трибосполучень, до яких належать циліндрові втулки та поршневі кільця, а також колінчатий вал та вкладиші підшипників ковзання. Діагностика технічного стану цих елементів може бути виконана за аналізом моторної оливи, що використовується в їхніх системах циркуляційного мащення. Експериментальні дослідження, що були виконані на судових чотиритактних дизелях 6R26 Wartsila, дозволяють зробити такі висновки.

1. Аналіз зміни одного з основних експлуатаційних показників моторної оливи Castrol 15W20 (яким є загальне лужне число TBN) підтвердив правильність експлуатації системи циркуляційного мащення дизеля. Значення TBN за 1000 годин експлуатації дизеля знизилось від початкової величини 14,0 мгКОН/г до рівня 10,3...11,2 мгКОН/г, що відповідає рекомендаціям, які висуваються

з боку фірми-виробника. При цьому під час відбору проб (які виконувались кожні 200 годин експлуатації дизеля) спостерігались як поступові, також і стрибкоподібні зміни TBN.

2. Як додатковий параметр діагностування технічного стану трибосполучень суднових дизелів може бути прийнята швидкість зміни загального лужного числа оливи  $V_{\text{TBN}}$  за певний проміжок часу. Для різних проміжків часу (200, 400, ... 1000 годин) її зміна становить  $(0,41 \dots 0,61) - (0,17 \dots 0,19) \frac{\text{мгКОН/г}}{\text{год}}$ .

3. Найбільш інформативним способом діагностування технічного стану трибосполучень суднових дизелів є спектральний аналіз моторної оливи, який дозволяє визначити вміст в оливі елементів, що характеризують знос контактних поверхонь дизеля, – Wear Elements, та елементів, що характеризують забруднення оливи, – Contaminant Elements. Обмеженням цього методу є необхідність його проведення виключно у берегових дослідницьких лабораторіях, що збільшує інтервал інформативності та підвищує час прийняття рішень зі зміни умов експлуатації дизеля.

4. Через збіг динаміки зміни вмісту в оливі компонентів, що характеризують знос його трибосполучень та потрапляння до оливи забруднюючих речовин (Wear Elements / Contaminant Elements), та швидкості зміни загального лужного числа оливи  $V_{\text{TBN}}$  саме швидкість зміни загального лужного рекомендується як параметр, за яким доцільно виконувати експрес-діагностику технічного стану трибосполучень дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту. До таких трибосполучень насамперед належать поршневі кільця та втулка циліндра, а також вкладиш підшипника та колінчатий вал. Збільшення швидкості зміни загального лужного відповідає збільшенню концентрації у оливі компонентів, що характеризують знос саме цих елементів дизеля.

## 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.
2. 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.
3. Budashko V., Shevchenko V. Solving a task of coordinated control over a ship automated electric power system under a changing load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 2 (2 (110)). P. 54–70. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229033>.
4. Zablotskiy Yu.V., Sagin A.S. Applying of fuel additives in marine diesel engines. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2021. Вип. 43. С. 5–17. DOI: 10.31653/smf343.2021.5-17.
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. 12. 1440. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.

6. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10 (10). P. 1373. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.
7. 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* : науково-технічний збірник. 2023. Вип. 46. С. 101–109. DOI: 10.31653/smf46.2023.101-109.
8. Заблоцький Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок. *Вісник Одеського національного морського університету* : збірник наукових праць. 2020. № 2 (62). С. 106–119. DOI: 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.
9. 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. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
10. Budashko V., Sandler A., Shevchenko V. Diagnosis of the Technical Condition of High-tech Complexes by Probabilistic Methods. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2022. Vol. 16 (1). P. 105–111. DOI: <https://doi.org/10.12716/1001.16.01.11>.
11. Sagin S., Madey V., Stoliaryk T. Analysis of mechanical energy losses in marine diesels. *Technology Audit and Production Reserves*. 2021. Vol. № 5 (2 (61)). P. 26–32. DOI: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239698>.
12. 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.
13. Petrychenko O., Levinskyi M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport. *Sustainability*. 2025. V. 17. P. 2141. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
14. 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.
15. 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>.
16. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка суднових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками. *Автоматизація суднових технічних засобів* : науково-технічний збірник. 2021. Вип. 27. С. 108–119.
17. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 41. С. 10–14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.

18. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін А.С. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі. *Автоматизація суднових технічних засобів* : науково-технічний збірник. 2021. Вип. 27. С. 93–107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.
19. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Comparative assessment of marine diesel engine oils. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2021. № 7–8. P. 29–35. DOI: <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
20. 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. № 7–8. P. 14–17. DOI: <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
21. Sagin S., Kuropyatnyk O., Rusnak D. Improvement of the process of cleaning exhaust gases of marine diesels from sulfur oxides. *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. № 4(1 (84)). P. 72–79. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.337616>.
22. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 41. С. 5–9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
23. 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* : науково-технічний збірник. 2023. Вип. 47. С. 157–171. DOI: 10.31653/smf47.2023.157-171.
24. Stoliaryk T. Analysis of the operation of marine diesel engines when using engine oils with different structural characteristics. *Technology Audit and Production Reserves*. 2022. Vol. 5(1 (67)). P. 22–32. DOI: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.265868>.
25. Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури суднових дизелів. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2022. Вип. 44. С. 121–131. DOI: 10.31653/smf44.2022.121-131.

## REFERENCES

1. Varbanets, R., Fomin, O., Píšťek, 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.
2. 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.
3. Budashko, V., Shevchenko, V. (2021). Solving a task of coordinated control over a ship automated electric power system under a changing load.

- Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 2 (2 (110)). P. 54–70. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229033>.
4. 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.
  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. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.
  6. Sagin, S., Madey, V., Sagin, A., Stoliaryk, T., Fomin, O., Kučera, P. (2022). Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels. *Journal of Marine Science and Engineering*. Vol. 10 (10). P. 1373. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.
  7. Sagin, S.V., Bondar, S.A. (2023). Metod popередzhenya avariinih situacii pid chas ekspluatatsii sudnovih dizeliv za analizom potocu vidmov iogo osnovnih vuzliv. *Ship power plants*. 46. 101–109. DOI: 10.31653/smf46.2023.101-109.
  8. Zablotskyi, Yu.V. (2020). Pidvishenya palivnoi economichnosti sudnovih dizelnih ustanovok. *Visnik Odeskogo nacionalnogo morskogo universitetu*. 2. 106–119. DOI: 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.
  9. 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. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
  10. Budashko, V., Sandler, A., Shevchenko, V. (2022). Diagnosis of the Technical Condition of High-tech Complexes by Probabilistic Methods. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. Vol. 16 (1). P. 105–111. DOI: <https://doi.org/10.12716/1001.16.01.11>.
  11. Sagin, S., Madey, V., Stoliaryk, T. (2021). Analysis of mechanical energy losses in marine diesels. *Technology Audit and Production Reserves*. Vol. № 5 (2 (61)). P. 26–32. DOI: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239698>.
  12. Sagin, S.V., Sagin, A.S. (2023). Control ta diagnostuvanya nadiinosti ta economichnosti dizeliv morskikh ta richkovih zasobiv transportu. *Ship power plants*. 46. 118–131. DOI: 10.31653/smf46.2023.118-131.
  13. Petrychenko, O., Levinskyi, M., Goolak, S., Lukoševičius, V. (2025). Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport. *Sustainability*. 17. 2141. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
  14. Sagin, S.V., Suvorov, P.S., Bondar, S.A. (2023). Rozrobka metodu ocinki rizikiv vineknenya avariinih podii pid chas eksplyatatsii dizeliv morskikh suden. *Ship power plants*. 47. 122–130. DOI: 10.31653/smf47.2023.122-130.
  15. 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>.
16. Sagin, S.V., Stolyaryk, T.O. (2021). Dinamika sudnovih dizeliv pid chas vikoristanya motornich mastil z riznimi structurnimi karakteristikami. *Automation of ship technical facilities*. 27. 108–119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
  17. Marchenko, O.O., Sagin, S.V. (2020). Vdoskonalenyа procesu ochishenya sudnovih vazhkih paliv. *Ship power plants*. 41. 10–14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
  18. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, A.S. (2021). Robota sudnovogo dizelya na biodizelnomu palivi. *Automation of ship technical facilities*. 27. 93–107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.
  19. Sagin, S.V., Stoliaryk, T.O. Comparative assessment of marine diesel engine oils. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2021. № 7–8. P. 29–35. DOI: <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
  20. 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. DOI: <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
  21. Sagin S., Kuropyatnyk O., Rusnak D. Improvement of the process of cleaning exhaust gases of marine diesels from sulfur oxides. *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. № 4 (1 (84)). P. 72–79. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.337616>.
  22. Poberezhniy, R.V., Sagin, S.V. (2020). Zabezpechennya ekologichnykh pokaznykiv dizeliv suden richkovogo ta morskogo transportu. *Ship power plants*. 41. 5–9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
  23. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, S.S., Chimshir, V.I., Razinkin, R.O. (2023). Analiz ekologichnoi stiicosti ta energetichnoi efektyvnosti vikoristanya scrubernogo ochishenya vipusknich gaziv dizeliv sudden morskogo transportu. *Ship power plants*. 47. 157–171. DOI: 10.31653/smf47.2023.157-171.
  24. Stoliaryk, T. (2022). Analysis of the operation of marine diesel engines when using engine oils with different structural characteristics. *Technology Audit and Production Reserves*. Vol. 5(1 (67)). P. 22–32. DOI: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.265868>.
  25. Zablotskyi, Yu.V., Sagin, A.S. (2022). Vznachennya dunamichnih navantazhen pid chas zmini rezhimiv mashchennya preciziiinich par palivnoi aparaturi sudnovih diziliv. *Ship power plants*. 44. 121–131. DOI: 10.31653/smf44.2022.121-131.

Дата першого надходження статті до видання: 24.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 26.11.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті: 26.12.2025

**ВИКОРИСТАННЯ ГІДРООЧИЩЕНОЇ РОСЛИННОЇ ОЛІЇ  
З ДОБАВКОЮ ВОДНЮ У СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНАХ:  
СУЧАСНИЙ СТАН І ПРОБЛЕМИ ЗАСТОСУВАННЯ**

**Д.О. Шалапко<sup>1</sup>, О.І. Соломенцев<sup>2</sup>, О.О. Кухаренко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>к.т.н., доцент кафедри суднового машинобудування та енергетики,  
Херсонський навчально-науковий інститут,  
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,  
м. Херсон, Україна,  
ORCID ID: 0000-0003-3962-3101

<sup>2</sup>д.т.н., професор кафедри суднового машинобудування та енергетики,  
Херсонський навчально-науковий інститут,  
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,  
м. Херсон, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-5106-6486

<sup>3</sup>аспірант,  
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,  
м. Миколаїв, Україна,  
ORCID ID: 0009-0007-4764-7185

**Анотація**

*Вступ. Стаття присвячена використанню альтернативних палив в суднових двигунах внутрішнього згоряння. А саме аналізується робота суднових дизельних двигунів на гідроочищеній рослинній олії (HVO) з газовою добавкою водню ( $H_2$ ) як спосіб знизити викиди й поліпшити паливну ефективність без суттєвої перебудови суднової енергоустановки. HVO розглядається як парафінове відновлюване дизельне паливо з високим цетановим числом, а водень – як газова добавка у впуск, що коригує ранні стадії згоряння. Мета. Метою роботи є узагальнити дані щодо роботи дизельних двигунів на HVO і при роботі на HVO з добавкою водню ( $H_2$ ) та оцінити вплив малих часток водню на затримку самозаймання, фазування згоряння, форму кривої тепловиділення й максимальний тиск. Також розглянуто зміни BSFC/SFOC,  $NO_x$  і твердих частинок. Результати. Показано, що HVO може застосовуватися як основне паливо за умови врахування його густини в дозуванні, забезпечення змащувальних властивостей і сумісності паливної апаратури. У режимі монопалива HVO дає стабільніше самозаймання та меншу димність і викиди твердих частинок без помітних втрат паливної економічності. Додавання невеликих часток  $H_2$  у впуск скорочує затримку самозаймання, змінює CA50 до ВМТ і зменшує утворення сажі, але підвищує пікові температури й швидкість наростання тиску, що сприяє зростанню  $NO_x$ . Узагальнені результати подано у вигляді погоджених таблиць і тривимірної поверхні компромісу «частка  $H_2$  – зміна BSFC – зміна  $NO_x$ », яка дозволяє виділяти області виграшу та ризику. Висновки. Режим HVO з газовим збагаченням воднем (HVO- $H_2$ ) визначено як технічно перспективне проміжне рішення для суднових дизельних двигунів.*

здатне знижувати викиди твердих частинок і димність без суттєвої втрати паливної економічності за умови узгодженого керування фазуванням згоряння, повітряним трактом і системами післяобробки. Наголошено на потребі довготривалих випробувань на великих суднових двигунах і на стандартизації процедур безпечної роботи з воднем.

**Ключові слова:** HVO, водень, дизельний двигун, суднова енергоустановка,  $NO_x$ , тверді частинки, економічність, згоряння.

## USE OF HYDRO-REFINED VEGETABLE OIL WITH ADDED HYDROGEN IN MARINE DIESEL ENGINES: CURRENT STATUS AND APPLICATION PROBLEMS

D.O. Shalapko<sup>1</sup>, O.I. Solomyentsev<sup>2</sup>, O.O. Kukharenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., Associate Professor of the Department of Ship Engineering and Power Engineering,  
Kherson Educational and Research Institute,  
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0003-3962-3101

<sup>2</sup>Doctor of Science, Professor of the Department of Ship Engineering and Power Engineering,  
Kherson Educational and Research Institute,  
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-5106-6486

<sup>3</sup>Postgraduate,  
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,  
ORCID ID: 0009-0007-4764-7185

### Summary

**Introduction.** The article focuses on the use of alternative fuels in marine internal combustion engines. Namely, the operating mode of marine diesel engines on hydrotreated vegetable oil (HVO) with a hydrogen ( $H_2$ ) additive is analyzed to reduce emissions and improve fuel efficiency without significant restructuring of the ship's power plant. HVO is considered a paraffinic renewable diesel fuel with a high cetane number, while hydrogen is treated as an intake gas additive that modifies the early stages of combustion. **Purpose.** This study aims to summarize data on the operation of diesel engines using HVO and in HVO- $H_2$  mode, and to evaluate the effect of small hydrogen fractions on ignition delay, combustion phasing, heat release rate shape, and maximum pressure. Changes in BSFC/SFOC,  $NO_x$ , and particulate matter are also considered. **Results.** It is demonstrated that HVO can be used as the primary fuel, provided its density is accounted for in the dosing strategy and that lubricity and fuel system compatibility are ensured. In neat-fuel mode, HVO provides more stable auto-ignition and lower smoke and particulate emissions, with no noticeable loss in fuel economy. Adding small fractions of  $H_2$  into the intake reduces ignition delay, shifts the CA50 towards TDC, and decreases soot formation; however, it increases peak temperatures and pressure rise rates, which promotes higher  $NO_x$  formation. The summarized results are presented as harmonized tables and a three-dimensional compromise surface, " $H_2$  share – change in BSFC – change in  $NO_x$ ," which highlights regions of benefit and risk. **Conclusions.** The HVO operating mode with gaseous hydrogen enrichment (HVO- $H_2$ ) is identified as a technically promising intermediate

*solution for marine diesel engines, capable of reducing particulate emissions and smoke without significant loss of fuel economy, provided that combustion phasing, the air path, and aftertreatment systems are properly coordinated. The need for long-term tests on large marine engines and for standardised procedures for safe hydrogen handling is emphasised.*

**Key words:** *HVO, hydrogen, diesel engine, marine power plant, NO<sub>x</sub>, particulate matter, fuel economy, combustion.*

### **Вступ**

Сучасний морський сектор перебуває у фазі інтенсивного переходу до низьковуглецевих технологій, однак у цій статті розглянуто лише один із можливих проміжних підходів – конфігурація HVO–H<sub>2</sub> для суднових дизельних двигунів. Тиск на галузь створюють і міжнародні екологічні правила (обмеження на викиди оксидів азоту (NO<sub>x</sub>), частинок та вимоги до енергоефективності), і економічні фактори: подорожчання традиційних палив, зростання витрат на виконання екостандартів та ризик великих збитків у разі екологічних порушень. На цьому фоні конфігурація HVO з додаванням водню (HVO–H<sub>2</sub>) виглядає однією з реалістичних проміжних ступенів «декарбонізації» для суднових дизельних енергетичних установок. У подальшому під конфігурацією HVO–H<sub>2</sub> розумітимемо варіант роботи, в якій HVO залишається єдиним основним енергетичним паливом, а водень виконує роль керувальної газової добавки у впуск, тобто «двопаливність» має енергетично асиметричний характер. HVO (гідрогенізована або гідрооброблена рослинна олія, парафіновий “renewable diesel” за стандартом EN 15940) зберігає сумісність типу “drop-in” (пряма заміна без конструктивної перебудови) з сучасними системами дизельного упорскування, має підвищене цетанове число і низький вміст ароматичних вуглеводнів [1; 2]. Водень, що подається невеликими порціями у впускний тракт, може прискорювати початкові стадії окиснення, зменшуючи затримку самозаймання і пригнічуючи утворення сажі [3]. Однак за надто інтенсивного тепловиділення та підвищення пікових температур можливе зростання викидів NO<sub>x</sub> і «жорсткості» згоряння [4]. В свою чергу даний процес, вимагає цілеспрямованого керування фазуванням процесу (положенням умовного кута CA50), погодження режимів наддуву та рециркуляції відпрацьованих газів (EGR), а також грамотного застосування систем обробки відпрацьованих газів (SCR, DPF) [5].

Запропоноване дослідження покликане виконати дві ключові задачі. Перша полягає у впорядкуванні в єдину методологічну систему та всебічному аналізі наявних експериментальних і розрахункових даних щодо впливу домішок водню та HVO на індикаторні параметри процесу згоряння [3; 4]. Особливу увагу приділено зміні затримки самозаймання, формі й структурі кривої швидкості тепловиділення, розподілу енергії між ранньою та пізньою фазами згоряння, динаміці показників CA10, CA50, CA90, максимальному тиску в циліндрі, швидкості наростання тиску, а також стабільності циклів за індикаторними та частково NVH-характеристиками [6; 7]. Друга – полягає в установленні зв'язку між виявленими змінами та паливною економічністю й екологічними показниками з урахуванням умов практичної інтеграції режиму HVO–H<sub>2</sub> в СЕУ [5; 7]. Тут важливими є конфігурація наддуву

й охолодження наддувного повітря, можливості та обмеження EGR, робота систем SCR/DPF, вплив підвищених температур навколишнього повітря у тропічному кліматі, а також відмінності між маневровими режимами і усталеним ходом у рейсі [8].

### **Постановка проблеми**

Мета роботи – систематизувати сучасні науково-технічні результати щодо застосування гідроочищеної рослинної олії (HVO) та її поєднання з водневою добавкою ( $H_2$ ) у судових дизельних двигунах, узагальнити вплив на затримку самозаймання, фазування та жорсткість згоряння, паливну економічність і викиди, а також сформулювати обмеження наявної експериментальної бази та напрями подальших досліджень для судових умов експлуатації. По-перше, розглядаються паливні властивості HVO та його сумісність зі стандартом EN 15940: діапазони цетанового числа, густини, в'язкості, поведінка за низьких температур, а також відмінності від мінерального дизельного палива [1; 6]. Окремо аналізується, як ці властивості впливають на гідродинаміку струменя під час упорскування, процес розпилювання та випаровування, теплопровідність і теплоємність палива [2; 8]. По-друге, оцінюється вплив малих домішок водню, що подаються у впуск або порти, на кінетику та термодинаміку згоряння HVO. Тут цікавлять зміни індикаторних параметрів, стабільність горіння, межі стійкої роботи без пропусків займання і без надмірного підвищення жорсткості згоряння [9; 10]. По-третє, аналізується системна інтеграція режиму HVO– $H_2$  у судову енергоустановку: роль наддуву та охолодження наддувного повітря, рециркуляції відпрацьованих газів, роботи SCR/DPF, а також пошук компромісу між запобіганням утворенню  $NO_x$  (через керування фазуванням згоряння, охолодження наддувного повітря, застосування EGR) та їх подальшою нейтралізацією в системі SCR з урахуванням реальних профілів навантаження судових двигунів [10; 11]. По-четверте, окреслюються існуючі прогалини досліджень і технічні питання, які поки що не дають можливості впевнено масштабувати застосування режиму HVO– $H_2$  на флоті: робота в умовах високих температур та вологості, довготривала надійність і деградація елементів паливної, повітряної і газовідвідної систем, відсутність повністю уніфікованих методик індикаторних вимірювань і емісійних оцінок, а також питання безпеки при зберіганні і подачі водню на борту [7; 12].

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Гідрооброблене рослинне дизельне паливо (HVO, hydrotreated/hydroprocessed vegetable oil) належить до парафінових “renewable diesel” і за своєю будовою є сумішшю нормальних та ізопарафінів приблизно діапазону  $C_{10}$ – $C_{20}$  з дуже малою кількістю ароматичних сполук і нульовим вмістом сірки [1]. Така хімічна структура палива вносить його у зону високих значень цетанового числа і робить процес самозаймання більш передбачуваним та стабільним [2]. Для дизельних двигунів це особливо важливо, тому що момент займання й характер розвитку згоряння визначають не тільки індикаторні параметри, а й рівень викидів.

У порівнянні з традиційним дизельним паливом за нормами EN 590 HVO зазвичай має нижчу густину (при 15 °C порядку 0,77–0,79 кг/л) і кінематичну в'язкість у робочому діапазоні систем упорскування близько 2–4 мм<sup>2</sup>/с при 40 °C [2]. Цетанове число для HVO, як правило, знаходиться десь у межах 70–90, тобто значно

вище, ніж у звичайного дизельного палива [9]. З точки зору енергоємності важливо розрізняти два рівні: масовий і об'ємний. Масова нижча теплота згоряння HVO близька до «стандартного» дизеля, проте через меншу густину, енергії в одному літрі трохи менше [10]. У практичному плані це означає, що системи, які дозують паливо «за об'ємом» (витратоміри, картографія витрати палива на валово-генераторних режимах), будуть чутливими до зміни густини, тоді як системи з масовими витратомірами будуть менш чутливими.

Екологічно HVO як основне паливо, за незмінних параметрів наддуву й керування, зазвичай дає помітне зниження димності та РМ без відчутної втрати економічності; реальний ефект по  $\text{NO}_x$  і BSFC суттєво визначається налаштуваннями паливоподачі, наддуву та EGR [4; 5; 11].

Використання водню як добавки у дизельному двигуні з запальним упорскуванням HVO розглядається як спосіб посилити ранні стадії окиснення: широкі межі займистості, висока швидкість поширення полум'я та низька енергія запалення роблять  $\text{H}_2$  ефективним прискорювачем преміксованої фази горіння [12]. Це, як правило, веде до скорочення затримки самозаймання, зміщення CA50 ближче до ВМТ, виразнішого «піку» тепловиділення та зменшення утворення сажі й викидів CO/HC, але разом із тим – до підвищення пікових температур, зростання  $\text{NO}_x$  і жорсткості згоряння через більший  $dp/d\phi$  [14]. Основними діагностичними критеріями залишаються положення CA50, максимальна швидкість наростання тиску, форма кривої тепловиділення та температурні індикатори (Твідп, оцінки пікових температур у циліндрі) [3; 12]. Якщо керування двигуном адаптоване так, щоб утримувати CA50 в оптимальній зоні й обмежувати  $dp/d\phi$  і  $p_{max}$ , невеликі добавки  $\text{H}_2$  можуть забезпечувати зниження або, принаймні, відсутність погіршення питомої витрати палива при істотному зменшенні РМ; за відсутності такої адаптації виграш по сажі часто нівелюється зростанням  $\text{NO}_x$ , жорсткості та ризиків для надійності [14].

Для допустимих концентрацій водню у великогабаритних дизельних двигунах індикаторні діаграми змінюються досить очікувано [12]:

- вигорання палива й тепловиділення: CA50 зміщується у бік менших кутів, максимальна швидкість тепловиділення зростає, тривалість основної фази горіння скорочується;
- жорсткість роботи: зростання  $dp/d\phi$  майже завжди проявляється у підвищенні структурної жорсткості й шуму;
- $\text{NO}_x$ -РМ: викиди РМ зменшуються через краще окиснення залишкового горіння і зменшення холодних зон, тоді як  $\text{NO}_x$  намагається зростати, в разі відсутності EGR, більш глибокого охолодження наддувного повітря чи корекції SOI, VGT, тиску в рейці.

Слід зазначити, що наведена апроксимація має ілюстративний характер і відображає узагальнені тенденції за обмеженою вибіркою даних. За такої кількості точок можливі альтернативні апроксимуючі поверхні з порівнянною похибкою, а реальні багатофакторні процеси формування економічних та екологічних показників згоряння, як правило, мають нелінійну природу і залежать від конструкції двигуна, налаштувань паливоподачі, наддуву та умов випробувань. Тому кількісні висновки за результатами апроксимації слід трактувати як попередні, а не як універсальні закономірності.

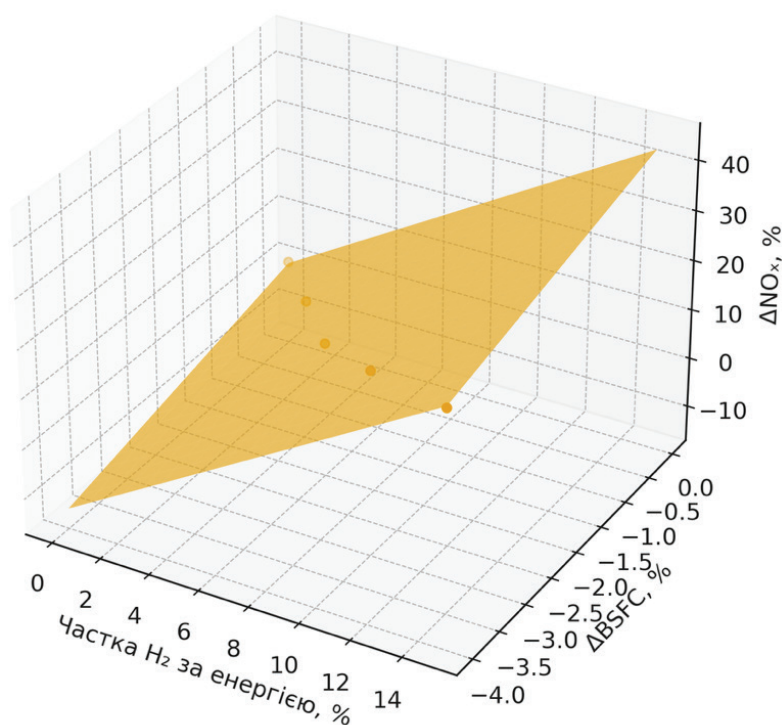


Рисунок 1. Площинна апроксимація компромісу між часткою водню, зміною питомої ефективної витрати палива  $\Delta BSFC$  та зміною викидів  $NO_x$ ,  $\Delta NO_x$  для режимів HVO–H<sub>2</sub> (агреговані дані літератури).

Графік на рис. 1 узагальнює компроміс між часткою водню, що додається до HVO, зміною питомої ефективної витрати палива та зміною концентрації викидів оксидів азоту [13]. По осі X відкладено енергетичну частку водню (від 0 до 15 %), по осі Y – зміну питомої ефективної витрати палива  $\Delta BSFC$  у відсотках відносно базового режиму на HVO без водню, по осі Z – відповідну зміну викидів  $NO_x$ ,  $\Delta NO_x$  у відсотках. Точки на поверхні відповідають узагальненим літературним даним для різних рівнів збагачення H<sub>2</sub>, а напівпрозора площина є їх лінійною апроксимацією, яка відображає глобальну тенденцію зміни показників у просторі «H<sub>2</sub> – економічність – NO<sub>x</sub>» [12].

З наведеного графіка випливає, що зі зростанням частки водню траєкторія робочих точок зміщується одночасно в бік зменшення  $\Delta BSFC$  та збільшення  $\Delta NO_x$ . Іншими словами, навіть відносно невеликі енергетичні домішки H<sub>2</sub> (порядку кількох відсотків) у наявних агрегованих даних спостерігається тенденція до зменшення питомої витрати палива, але одночасно фіксується зростання утворення NO<sub>x</sub>, без використання додаткових заходів. Площина на рис. 1 показує, що цей компроміс носить системний характер: для більшості реалізацій режиму HVO–H<sub>2</sub> перехід до «вигідніших» з точки зору BSFC областей неминуче пов'язаний із рухом у зону підвищених викидів NO<sub>x</sub>. Такий формат подання дозволяє в подальшому накладати на ту ж площину обмеження за нормативами викидів і допустимими межами  $\Delta BSFC$ , виділяючи області, де HVO–H<sub>2</sub> є технічно та екологічно прийнятним рішенням для суднових дизельних двигунів [5].

Системно виконані експерименти мають не просто фіксувати зміну форми кривих, а й пов'язувати ці зміни з кінцевими показниками питомої витрати палива, концентрації  $\text{NO}_x$ ,  $\text{PM}$  за фіксованих умов: задані частота обертання, ефективне навантаження, олкефіцієнт надлишку повітря, рівень EGR, температура та тиск наддувного повітря. Для порівняння бажано подавати нормовані зміни відносно базового HVO-режиму у відсотках, тобто показувати, на скільки відсотків змінюються вищевказані величини при переході до режиму HVO- $\text{H}_2$  [4].

**Формулювання цілей статті.** З урахуванням викладених передумов мета статті полягає в початковому систематичному огляді режимів HVO та HVO- $\text{H}_2$  для дизельних двигунів, близьких до суднових і стаціонарних середньооборотних установок. Для досягнення цієї мети вирішуються такі завдання. По-перше, на основі доступних експериментальних і модельних досліджень узагальнити дані про властивості HVO як парафінового дизельного палива, його сумісність із сучасними системами упорскування та характерні індикаторні й емісійні ефекти при роботі двигуна в режимі монопалива. По-друге, узагальнити результати щодо впливу малих домішок водню, що подається у впускний тракт, на затримку самозаймання, фазування тепловиділення, максимальний тиск і швидкість його наростання, а також на зміни BSFC,  $\text{NO}_x$  і  $\text{PM}$ . По-третє, показати можливість уніфікованого подання цих результатів у вигляді порівняльних таблиць і спрощеної тривимірної поверхні компромісу «частка водню –  $\Delta\text{BSFC}$  –  $\Delta\text{NO}_x$ », яка дозволяє виявити типові області виграшу й ризику. По-четверте, на основі отриманих узагальнень окреслити можливі сценарії інтеграції режиму HVO- $\text{H}_2$  до складу суднових енергетичних установок і найбільш суттєві прогалини, що потребують подальших цільових досліджень.

**Виклад основного матеріалу.** Експериментальні дослідження режимів HVO- $\text{H}_2$  включають аналіз індикаторних діаграм і похідних від них характеристик тепловиділення, оскільки саме за формою кривих  $p(\varphi)$  та HRR найбільш помітно проявляється вплив водню [3]. На фоні базового режиму на HVO майже всі роботи фіксують скорочення затримки самозаймання і зміщення центру тепловиділення ( $\text{CA}_{50}$ ) ближче до верхньої мертвої точки, що свідчить про посилення преміксованої фази горіння. Це супроводжується зростанням максимальної швидкості тепловиділення і, у частині випадків, підвищенням максимального тиску в циліндрі та жорсткості роботи двигуна. У роботах [3; 6; 7] для кількісної оцінки застосовано однозонні методики відновлення HRR за індикаторним сигналом, визначають  $\text{CA}_{10}$ ,  $\text{CA}_{50}$ ,  $\text{CA}_{90}$ , середній індикаторний тиск, контролюють градієнт тиску  $dp/d\varphi$  як інтегральний показник NVH-навантаження. При цьому завжди постає питання коректної фільтрації сигналу тиску, щоб відсікати високочастотний шум, пов'язаний не з хімічною кінетикою, а з віброакустикою системи. Характер змін виявляється чутливим до відповідних параметрів режиму роботи установки: навантаження, коефіцієнт надлишку повітря, рівень EGR, температур та тиск наддувного повітря. На часткових навантаженнях при зниженій температурі наддувного повітря зростання швидкості тепловиділення не обов'язково приводить до виходу максимального тиску в циліндрі ( $p_{\text{max}}$ ) і максимальної швидкості наростання тиску ( $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ ) за конструктивні обмеження, тоді як на близьких до номінальних

навантаженнях без корекції фазування упорскування та параметрів наддуву навіть помірні добавки  $H_2$  можуть «виштовхнути» двигун у зону надмірної жорсткості та перегрівів [13].

Ці ж зміни форми згоряння та температурного поля вносять вплив на паливну економічність й викиди [4]. Якщо для заданого двигуна вдається утримати CA50 в межах оптимальних значень (кілька градусів після ВМТ), обмежити приріст  $dp/d\phi$  і не допустити надмірного зростання  $P_{max}$ , то комбінація HVO– $H_2$  часто дає або нейтральний, або помірно позитивний вплив на питому ефективну витрату палива. Це відбувається завдяки більш компактному та «чистому» горінню зменшуються втрати в пізній фазі й покращується використання енергії палива. При цьому практично завжди фіксують істотне зниження димності та викидів твердих частинок, а також CO і незгорілих вуглеводнів – це прямий наслідок того, що водень не містить в собі вуглецю для появи сажі й покращує умови окиснення в холодних та переобтяжених зонах. В той же час щодо  $NO_x$  картина очікувано гірша: підвищення локальних пікових температур і прискорення початкової фази згоряння без запобіжних заходів призведе до зростання утворення термічного  $NO_x$ . Тому в більшості експериментальних програм додавання  $H_2$  розглядається не як «самодостатне» рішення, а як елемент комплексу, де зниження РМ досягається самим характером згоряння, а параметр  $NO_x$  керується поєднанням рециркуляції, поглибленого охолодження наддувного повітря, коригування кута випередження впорскування палива, застосуванням SCR [10; 11]. У випадку, коли керування під  $H_2$  не адаптують, нерідко фіксують погіршення показників витрати палива через відхід від оптимального профілю тепловиділення: надто ранній CA50 і зavelикий PRR підвищують втрати, а вигравш по РМ досягається ціною економічності та ресурсу. Саме тому для міжпорівняння результатів важливо подавати не тільки абсолютні значення BSFC,  $NO_x$ , РМ, а й їх відносні зміни щодо базового HVO-режиму у відсотках при чітко зафіксованих параметрах двигуна  $n$ ,  $Ne$ ,  $\lambda$ , EGR,  $T_2$ ,  $p_2$ .

В існуючих СЕУ ці «локальні» ефекти на рівні циліндра не можна розглядати відірвано від систем наддуву, охолодження й післяобробки, а також від загальної архітектури паливно-газової частини. Турбокомпресори з керованою геометрією лопаток, двоступеневі схеми наддуву та керовані охолоджувачі наддувного повітря являються тим самим засобом, за допомогою якого можна сформувати такі температурно-теплові умови на впуску, щоб пікові температури в циліндрі й форма HRR залишалися в допустимих межах при наявності  $H_2$  [11]. EGR, у свою чергу, дає можливість «зрізати» утворення  $NO_x$  ще на стадії основного горіння, тоді як SCR бере на себе залишкові оксиди азоту; для РМ, навпаки, HVO– $H_2$  дозволяє зменшити навантаження на DPF і оптимізувати режими регенерації. На цьому накладається специфічний судовий контекст: вимоги до безпеки при використанні низькотемпературних палив, застосовність підходів, подібних до Кодексу IGF, необхідність проходження процедур “Alternative Design” за SOLAS, правильне розміщення балонів або криогенних систем зберігання  $H_2$  з точки зору доступу, захисту від механічних ушкоджень, вентиляції та зон класифікації. Машинне відділення – складний з погляду газової безпеки простір, де водень, будучи набагато

легшим за повітря, накопичується у верхніх зонах; отже, схеми вентиляції, розташування датчиків, алгоритми аварійного відсікання подачі та провітрювання мають проектуватися одразу з урахуванням водню. У підсумку інтеграція HVO–H<sub>2</sub> у CEY – це не тільки питання індикаторних діаграм і карт BSFC–NO<sub>x</sub>–PM, а комплексна задача сумісного налаштування згоряння, наддуву, EGR/SCR/DPF, паливно-газової інфраструктури й процедур безпечної експлуатації, причому з оглядом на реальні профілі навантаження й кліматичні умови рейсів. Саме через такий підхід експериментальні спостереження згоряння мають інтерпретуватися не виокремлено, а у прив'язці до того, наскільки отримані режими є життєздатними для тривалої роботи судна, а не лише для короткочасних стендових випробувань.

Підсумковим етапом огляду доцільно зробити формування набору порівняльних таблиць і узагальнювальних «карт прогалин», які дозволять перейти від розрізнених результатів окремих авторів до цілісної картини по системі HVO–H<sub>2</sub> [3]. Запропоновано, що базовим інструментом узагальнення є блок порівняльних таблиць (табл. 1–4) з фіксованим набором параметрів, щоб усі залучені джерела можна було порівнювати в єдиному форматі. Умовна табл. 1 присвячена властивостям HVO: у ній зводяться діапазони цетанового числа, густини, в'язкості, вмісту ароматичних сполук, показників холодоплинності (CFPP) та відмінностей від базового дизельного палива [1; 2]. Це дозволяє одразу бачити, у яких роботах використано «типове» HVO, а де – сорти з нестандартними характеристиками, що може пояснювати розбіжності в індикаторних та емісійних результатах [4; 6].

Таблиця 1

**Порівняння властивостей EN 590 дизеля та HVO**

Паливо	DCN	Густина 15 °С, кг/м <sup>3</sup>	В'язкість 40 °С, мм <sup>2</sup> /с	Ароматика, % мас.	CFPP, °С (типове)
EN 590 дизель	52	835	3,0	≈5 (≤8–11 макс.)	–10
HVO (EN 15940)	75	780	2,8	~0	≈– 25

Табл. 2 узагальнює архітектури подачі водню, які розглядалися в основному для середньооберткових чотиритактних дизельних двигунів: маніфолдне дозування, подача в порти впуску, а також інші варіанти (наприклад, пряме впорскування чи використання реформату). Для кожної роботи тут фіксуватимуться діапазони часток H<sub>2</sub> (у масовому та енергетичному вираженні), основні особливості схеми безпеки (редукування, запірні арматура, вентиляція, детекція), а також тип двигуна й характер експериментальної установки. Для малооберткових двотактних головних двигунів такі схеми зовнішнього сумішоутворення з воднем у впускному тракті практично не застосовуються через високі ризики займання воднево-повітряної суміші в продувочних та випускних ресиверах, тому надалі вони не розглядаються як реалістичні варіанти модернізації. Таким чином, можна відокремити «чисто кінетичні» ефекти від тих, що обумовлені конкретною схемою подачі та обмеженнями за безпекою [14; 15].

Таблиця 2

Архітектури подачі водню

Архітектура подачі H <sub>2</sub>	Типові частки H <sub>2</sub> (енергетичні, %)	Переваги	Основні обмеження / ризики
Маніфолдне дозування (після інтеркулера)	3–15	Найпростіший ретрофіт, мінімум змін у головці циліндра(ів)	Гірший розподіл між циліндрами, ризик локальних збагачень
Портове дозування (біля впускного клапана)	3–20	Кращий баланс по циліндрах, стабільніший CA50	Складніша газова арматура, вимоги до герметичності й термостійкості
Пряме впорскування H <sub>2</sub> у циліндр	10–40	Максимальний контроль стехіометрії та фазування	Потрібна повна переробка циліндрових кришок та газорозподільного вузла, спеціальні форсунки, жорсткі вимоги до безпеки

Це не «дані одного досліджу», а агрегований огляд за кількома роботами, де [3; 5; 13]:

- малі енергетичні частки H<sub>2</sub> дають або нейтральний, або невеликий плюс по BSFC;
- NO<sub>x</sub> зростає без EGR/охолодження;
- PM істотно падає.

Таблиця 3

Узагальнені тренди ΔBSFC/ΔNO<sub>x</sub>/ΔPM від частки H<sub>2</sub>

Частка H <sub>2</sub> за енергією, %	ΔBSFC, %	ΔNO <sub>x</sub> , %	ΔPM/димність, %
0	0	0	0
3	- 1	+ 5	- 15
6	- 2	+ 10	- 30
10	- 3	+ 20	- 45
15	- 4	+ 30	- 60

Таблиця 4

Системні рішення для інтеграції в CEУ

Рішення	Рівень складності	Очікуваний вплив на NO <sub>x</sub> /PM/BSFC (HVO–H <sub>2</sub> )
Одноступеневий наддув + інтеркулер, без EGR та SCR	Низький	↓PM, NO <sub>x</sub> зростає/нейтральний, BSFC ≈0...– 3 %
Одноступеневий наддув + охолоджуваний EGR + SCR	Середній	↓PM, NO <sub>x</sub> до нормативів, невеликий штраф по BSFC можливий
Двоступеневий наддув з проміжним охолодженням + EGR + SCR/DPF	Високий	↓PM, NO <sub>x</sub> до Tier III, BSFC зберігається або покращується
Схеми з утилізацією теплоти (ORC, waste-heat recovery)	Високий	Додаткове зменшення питомої витрати без істотного впливу на NO <sub>x</sub> /PM

У табл. 3 зведено експериментальні результати згоряння і викидів для режимів HVO–H<sub>2</sub> у прив'язці до режимних координат: ефективно навантаження та частота

обертання, частка  $H_2$ , основні індикаторні показники (затримка самозаймання, CA50, максимальний тиск, градієнт тиску, IMEP) і відповідні прирости або зміни BSFC,  $NO_x$ , PM порівняно з базовим HVO-режимом [7]. Така структура дозволить бачити не лише «середній» ефект від водню, а й те, у яких саме режимах він досягається, де спостерігаються обмеження по жорсткості чи термонавантаженню, і де даних взагалі бракує (наприклад, для низьких навантажень або тропічних умов всмоктування повітря).

Табл. 4 орієнтована на інтеграційні рішення в складі суднових енергоустановок: які конфігурації наддуву та охолодження наддувного повітря застосовуються, чи використовується EGR, які системи післяобробки (SCR, DPF) залучені, у яких профілях навантаження проводилися дослідження та яких «підсумкових» ефектів вдалося досягти на рівні всієї СЕУ (зміна питомої витрати, викидів, експлуатаційних обмежень) [10]. На основі цих таблиць буде змога побудувати умовні «карти прогаліни», де по осях розміщуються тип двигуна, рівень інтеграції (лише циліндр, двигун у стендовому виконанні, повноцінна СЕУ), діапазон часток  $H_2$ , кліматичні умови й тривалість випробувань, а в комірках – відмітка про наявність / відсутність даних і характер результатів. Це дозволить чітко показати, у яких сегментах (наприклад, середньооберткові чотиритактні двигуни з підвищеними частками  $H_2$ , тропічні умови, тривалі натурні випробування) наразі є найбільші прогаліни й куди доцільно спрямовувати подальші дослідження.

#### **Висновки**

1. Узагальнення наявних публікацій і експериментальних даних свідчить, що використання гідроочищеної рослинної олії (HVO) у поєднанні з водневою добавкою ( $H_2$ ) у суднових дизельних двигунах є технічно можливим напрямом, однак на сучасному етапі розвитку технологій не може розглядатися як просте та легкодоступне рішення для масового впровадження у флоті.

2. HVO як парафінове відновлюване дизельне паливо з високим цетановим числом і низьким вмістом ароматичних сполук у більшості досліджених випадків може застосовуватися за принципом *drop-in* за умови корекції циклової подачі палива, забезпечення достатньої змащувальної здатності та перевірки сумісності матеріалів елементів паливної системи.

3. Робота дизельних двигунів на HVO зазвичай характеризується стабільнішим самозайманням, зменшенням димоутворення та викидів твердих частинок, а також більш «чистим» перебігом процесу згоряння без суттєвого погіршення паливної економічності. Такі властивості створюють передумови для подальшого застосування газових добавок, зокрема водню.

4. Згідно з результатами, наведеними в літературних джерелах, додавання водню до HVO, як правило, призводить до скорочення затримки самозаймання, зсуву фази основного тепловиділення (CA50) у бік верхньої мертвої точки та зменшення викидів твердих частинок. Водночас у ряді робіт відзначається тенденція до підвищення викидів  $NO_x$  і жорсткості згоряння, що потребує цілеспрямованої оптимізації параметрів робочого процесу.

5. Для суднових енергетичних установок застосування комбінації HVO- $H_2$  доцільно розглядати виключно в комплексі з удосконаленням систем наддуву, охолодження наддувного повітря, рециркуляції та нейтралізації відпрацьованих

газів (EGR, SCR, DPF), а також із урахуванням вимог безпеки зберігання та подачі водню на борту судна. Отримані в роботі узагальнення мають характер оглядової оцінки та постановки науково-технічної задачі й не замінюють необхідності проведення спеціалізованих експериментальних досліджень на повномасштабних суднових дизельних двигунах.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. European Committee for Standardization. (2024). UNE EN 15940:2024 Automotive fuels – Paraffinic diesel fuel from synthesis or hydrotreatment – Requirements and test methods. Author.
2. Aatola H., Larmi M., Sarjovaara T., Mikkonen S. (2008). Hydrotreated vegetable oil (HVO) as a renewable diesel fuel: Trade-off between NO<sub>x</sub>, particulate emission, and fuel consumption of a heavy-duty engine. *SAE International Journal of Engines*. 1 (1). 1251–1262.
3. Wu Y., Ferns J., Li H., & Andrews G. (2017). Investigation of combustion and emission performance of hydrogenated vegetable oil (HVO) diesel. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*. 10 (3). 895–903.
4. Happonen M., Heikkilä J., Murtonen T., Lehto K., Sarjovaara T., Larmi M., Keskinen J., & Virtanen A. (2012). Reductions in particulate and NO<sub>x</sub> emissions by diesel engine parameter adjustments with HVO fuel. *Environmental Science & Technology*. 46 (11). 6198–6204.
5. Hunicz J., Krzaczek P., Gęca M., Rybak A., & Mikulski M. (2021). Comparative study of combustion and emissions of diesel engine fuelled with FAME and HVO. *Combustion Engines*. 184. 72–78.
6. Orliński P., Sikora M., Bednarski M., & Gis M. (2024). The influence of powering a compression ignition engine with HVO fuel on the specific emissions of selected toxic exhaust components. *Applied Sciences*. 14 (9). 5893.
7. Smigins R., Jesko U., Riepus C., & Sokolovskij E. (2023). Studies of engine performance and emissions at full-load conditions using HVO, diesel fuel, and HVO5. *Energies*. 16 (12). 4785.
8. Kuszewski H., Balawender K., Jaworski A., Ziółkowski A., Zelent P., et al. (2025). Performance of hydrotreated vegetable oil–diesel blends: Ignition and combustion insights. *Energies*. 18 (22). 5962.
9. Millo F., Ciaravino C., Marzano M. R., et al. (2025). Fundamental injection and combustion characteristics of neat hydrotreated vegetable oil (HVO) in a diesel engine. *Fuel*. 379. 132951.
10. Di Blasio G., Ianniello R., & Beatrice C. (2022). Hydrotreated vegetable oil as an enabler for highly efficient and ultra-low emission vehicles in view of 2030 targets. *Fuel*. 310. 122206.
11. d’Ambrosio S., Mancarella A., & Manelli A. (2022). Utilization of hydrotreated vegetable oil (HVO) in a Euro 6 dual-loop EGR diesel engine: Behavior as a drop-in fuel and potentialities along calibration parameter sweeps. *Energies*. 15 (19). 7202.

12. Szwaja S., Pukalskas S., Juknelevicius R., & Rimkus A. (2025). Combustion analysis of the renewable fuel HVO and RME with hydrogen addition in a reciprocating internal combustion engine. *Energies*. 18 (13). 3381.
13. Pinto G. M., Santos J.M., Afonso R.S., Santos, D., Guedes, A., & Gouveia, P. (2023). Combustion, performance and emission analyses of a CI engine operating with renewable diesel fuels (HVO/farnesane) under dual-fuel mode through hydrogen port injection. *International Journal of Hydrogen Energy*. 48 (57). 19713–19732.
14. Mukhtar G.A., Alahdal A.M., et al. (2024). Performance and emissions of a hydrogen dual-fuel engine using diesel and HVO as pilot fuels (SAE Technical Paper 2024-01-4286). SAE International.
15. Panait A., Popescu A., Dobre C.-G., et al. (2025). The use of hydrogen in the automotive diesel engine—An efficient solution to control its operation with reduced carbon emissions. *Sustainability*. 17 (22). 10369.

#### REFERENCES

1. European Committee for Standardization. (2024). UNE EN 15940:2024 Automotive fuels – Paraffinic diesel fuel from synthesis or hydrotreatment – Requirements and test methods. Author.
2. Aatola, H., Larmi, M., Sarjoavaara, T., & Mikkonen, S. (2008). Hydrotreated vegetable oil (HVO) as a renewable diesel fuel: Trade-off between NO<sub>x</sub>, particulate emission, and fuel consumption of a heavy duty engine. *SAE International Journal of Engines*. 1 (1). 1251–1262.
3. Wu, Y., Ferns, J., Li, H., & Andrews, G. (2017). Investigation of combustion and emission performance of hydrogenated vegetable oil (HVO) diesel. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*. 10 (3). 895–903.
4. Happonen, M., Heikkilä, J., Murtonen, T., Lehto, K., Sarjoavaara, T., Larmi, M., Keskinen, J., & Virtanen, A. (2012). Reductions in particulate and NO<sub>x</sub> emissions by diesel engine parameter adjustments with HVO fuel. *Environmental Science & Technology*. 46 (11). 6198–6204.
5. Hunicz, J., Krzaczek, P., Gęca, M., Rybak, A., & Mikulski, M. (2021). Comparative study of combustion and emissions of diesel engine fuelled with FAME and HVO. *Combustion Engines*. 184. 72–78.
6. Orliński, P., Sikora, M., Bednarski, M., & Gis, M. (2024). The influence of powering a compression ignition engine with HVO fuel on the specific emissions of selected toxic exhaust components. *Applied Sciences*. 14 (9), 5893.
7. Smigins, R., Jesko, U., Riepulius, C., & Sokolovskij, E. (2023). Studies of engine performance and emissions at full-load conditions using HVO, diesel fuel, and HVO5. *Energies*. 16 (12). 4785.
8. Kuszewski, H., Balawender, K., Jaworski, A., Ziółkowski, A., Zelent, P., et al. (2025). Performance of hydrotreated vegetable oil–diesel blends: Ignition and combustion insights. *Energies*. 18 (22). 5962.

9. Millo, F., Ciaravino, C., Marzano, M.R., et al. (2025). Fundamental injection and combustion characteristics of neat hydrotreated vegetable oil (HVO) in a diesel engine. *Fuel*. 379. 132951.
10. Di Blasio, G., Ianniello, R., & Beatrice, C. (2022). Hydrotreated vegetable oil as enabler for high-efficient and ultra-low emission vehicles in the view of 2030 targets. *Fuel*. 310. 122206.
11. d'Ambrosio, S., Mancarella, A., & Manelli, A. (2022). Utilization of hydrotreated vegetable oil (HVO) in a Euro 6 dual-loop EGR diesel engine: Behavior as a drop-in fuel and potentialities along calibration parameter sweeps. *Energies*. 15 (19). 7202.
12. Szwaja, S., Pukalskas, S., Juknelevicius, R., & Rimkus, A. (2025). Combustion analysis of the renewable fuel HVO and RME with hydrogen addition in a reciprocating internal combustion engine. *Energies*. 18 (13), 3381.
13. Pinto, G.M., Santos, J.M., Afonso, R.S., Santos, D., Guedes, A., & Gouveia, P. (2023). Combustion, performance and emission analyses of a CI engine operating with renewable diesel fuels (HVO/farnesane) under dual-fuel mode through hydrogen port injection. *International Journal of Hydrogen Energy*. 48 (57). 19713–19732.
14. Mukhtar, G.A., Alahdal, A.M., et al. (2024). Performance and emissions of a hydrogen dual-fuel engine using diesel and HVO as pilot fuels (SAE Technical Paper 2024-01-4286). SAE International.
15. Panait, A., Popescu, A., Dobre, C.-G., et al. (2025). The use of hydrogen in the automotive diesel engine—An efficient solution to control its operation with reduced carbon emissions. *Sustainability*. 17 (22). 10369.

Дата першого надходження статті до видання: 28.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті: 26.12.2025

## ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 519.865:338.518

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2025.4-27.08>

### РОЗРАХУНОК ІНТЕГРАЛЬНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ МАРШРУТІВ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ У США

**І.А. Вікович<sup>1</sup>, А.Ф. Обшта<sup>2</sup>, В.Е. Приходько<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>д.т.н., професор кафедри транспортних технологій,  
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна,  
ORCID ID: 0000-0003-0281-158X

<sup>2</sup>д.т.н., професор кафедри захисту інформації,  
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна,  
ORCID ID: 0000-0001-5151-312X

<sup>3</sup>аспірант кафедри транспортних технологій,  
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-7582-1693

#### **Анотація**

У статті досліджено підходи до визначення ефективності маршрутів у сфері міжнародних вантажних перевезень одноканковими автопоїздами (МВПОАП). Ефективність МВПОАП розглядається як багатофакторна характеристика, що включає економічні, часові, екологічні, соціальні та експлуатаційні показники. Автори акцентують увагу на необхідності комплексної оцінки логістичних рішень, яка повинна базуватись не тільки на традиційних критеріях витрат і тривалості МВПОАП, а й враховувати енергетичну, транспортну та дорожню ефективність засобів перевезень та фактори надійності постачання вантажів, екологічної сталості, ефективності використання ресурсів та технологічного супроводу транспортного процесу. У роботі наголошено на доцільності поєднання класичних методів оцінювання (вартість перевезення на милю, час доставки, індекси надійності) із сучасними багатокритеріальними підходами – Data Envelopment Analysis (DEA), АНР, TOPSIS, що дають змогу враховувати велику кількість параметрів під час вибору оптимального маршруту.

У межах порівняльного аналізу враховано досвід США, Німеччини, Польщі та Великої Британії щодо трактування ефективності маршрутів. Відзначено, що акценти в оцінці залежать від пріоритетів – економічної вигоди, екологічної безпеки, надійності логістичного ланцюга чи інтермодальної інтеграції. Враховано, що у німецьких дослідженнях домінує підхід сталого розвитку з інтеграцією критеріїв часу, витрат та пропускної спроможності інфраструктури. Польські вчені застосовують інструменти DEA для побудови багатовимірної моделі, тоді як британські дослідники акцентують на оцінці зовнішніх ефектів і енергоефективності.

Систематизовано результати провідних досліджень щодо цифрових інструментів оптимізації логістики: автоматизованого планування маршрутів, AI-рішень та програм типу Route4Me, які скорочують витрати, викиди CO<sub>2</sub>, підвищують інтенсивність перевезень і гнучкість системи до змін попиту. Підкреслено важливість телекомунікаційних і навігаційних систем для моніторингу ефективності автопоїздів, особливо в умовах складного рельєфу, платних доріг і транскордонного трафіку.

Запропоновано концепцію експертно-функціональної моделі оцінки ефективності маршрутів, що враховує енергетичну, транспортну та дорожню ефективність елементів перевізного процесу з урахуванням специфіки МВПОАП. Підкреслено, що сучасні дослідження МВПОАП зазвичай аналізують лише окремі параметри, тоді як запропонована математична модель інтегрує ключові чинники для формування обґрунтованих управлінських рішень у сфері міжнародних автоперевезень. Наголошено на потребі подальших досліджень, спрямованих на подолання нестачі якісних даних, недостатньої гнучкості наявних моделей та обмеженого охоплення критичних ризиків логістичної інфраструктури під час МВПОАП.

**Ключові слова:** міжнародні вантажні перевезення, автопоїзд, ефективність, маршрут, логістика, оптимізація, метод, критерій, багатокритеріальний аналіз, Data Envelopment Analysis, AHP, TOPSIS, енергетична, транспортна, дорожня ефективність, інтегральний показник, транспортна система, цифрові логістичні рішення, маршрутне планування.

## CALCULATION OF INTEGRAL EFFICIENCY INDICATORS FOR FREIGHT TRANSPORTATION ROUTES IN THE UNITED STATES

I.A. Vikovych<sup>1</sup>, A.F. Obshta<sup>2</sup>, V.E. Prykhodko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Transport Technologies,  
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0003-0281-158X

<sup>2</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Information Security,  
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0001-5151-312X

<sup>3</sup>PhD Student, Department of Transport Technologies,  
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-7582-1693

### Summary

The paper investigates approaches to assessing route efficiency in the field of international freight transportation performed by single-unit road trains. The efficiency of international freight transportation by road trains is considered as a multifactorial characteristic that includes economic, time-related, environmental, social, and operational indicators. The authors emphasize the necessity of a comprehensive evaluation of logistics decisions, which should be based not only on traditional criteria such as transportation costs and delivery time but also take into account the energy, transport, and road efficiency of transport vehicles, as well as supply reliability, environmental sustainability, resource efficiency, and technological support of the transportation process.

The study highlights the expediency of combining classical evaluation methods (cost per mile, delivery time, reliability indices) with modern multi-criteria decision-making approaches—Data Envelopment Analysis (DEA), Analytic Hierarchy Process (AHP), and TOPSIS—which enable the consideration of a large number of parameters when selecting an optimal transportation route.

Within the framework of a comparative analysis, the experience of the United States, Germany, Poland, and the United Kingdom in interpreting route efficiency is examined. It is noted that the emphasis in efficiency assessment depends on dominant priorities such as economic benefits, environmental safety, logistics chain reliability, or intermodal integration. German studies predominantly apply a sustainable development approach integrating time, cost, and infrastructure capacity criteria. Polish researchers actively use DEA tools to construct multidimensional efficiency models, whereas British studies focus on the assessment of external effects and energy efficiency.

The results of leading studies on digital logistics optimization tools are systematized, including automated route planning systems, artificial intelligence-based solutions, and software platforms such as Route4Me, which contribute to reducing costs and CO<sub>2</sub> emissions, increasing transportation intensity, and improving system flexibility in response to demand fluctuations. The importance of telecommunication and navigation systems for monitoring the operational efficiency of road trains is emphasized, especially under conditions of complex terrain, toll road networks, and cross-border traffic.

An expert-functional model for assessing route efficiency is proposed, which accounts for the energy, transport, and road efficiency of transportation process elements while considering the specific features of international freight transportation by road trains. It is emphasized that most contemporary studies analyze only individual parameters, whereas the proposed mathematical model integrates key factors to support well-founded managerial decision-making in the field of international road freight transportation. The necessity for further research aimed at overcoming data scarcity, limited flexibility of existing models, and insufficient coverage of critical logistics infrastructure risks is also highlighted.

**Key words:** international freight transportation; road train; efficiency; route; logistics; optimization; method; criterion; multi-criteria analysis; Data Envelopment Analysis; AHP; TOPSIS; energy efficiency; transport efficiency; road efficiency; integral indicator; transport system; digital logistics solutions; route planning.

### **Вступ**

Ефективність маршруту (МВПОАП) пов'язана з оптимізацією шляху руху вантажів між пунктами призначення за сукупністю критеріїв: ефективність конструкційних вузлів засобів перевезень, мінімізація часу, витрат (операційних та паливних), екологічних наслідків і забезпечення дотримання вимог доставки та безпеки [1].

Сучасне визначення ефективності маршруту МВПОАП базується на системному аналізі економічних, екологічних, соціальних і експлуатаційних чинників з використанням класичних транспортно-економічних залежностей та новітніх математичних та програмних цифрових інструментів.

Чинники, що визначають якість і надійність автотранспортних засобів та вплив дорожньо-транспортних умов експлуатації на ефективність перевезень загалом,

з урахуванням основних функцій інтелектуального транспорту, телекомунікаційних та навігаційних систем моніторингу параметрів автомобіля, його ідентифікації, диспетчерського керування та ефективності, розглянуто в [2].

У наукових джерелах США акцент спрямований на баланс між швидкістю, витратами й надійністю, а в Німеччині – на врахування часу, витрат, інфраструктури та сталості [3]. Серед альтернативних підходів до визначення ефективності маршруту можна виділити працю [4], де підкреслюється важливість взаємопов'язаності інфраструктур, інформаційної прозорості та цифрових рішень для підвищення ефективності транспортних коридорів.

Польські дослідники для ефективності маршруту використовують Data Envelopment Analysis (DEA), що охоплює витрати, обсяг, час і ресурси, ефективність маршруту [5]. У Великій Британії дослідження МВПОАП ґрунтуються на зовнішніх ефектах, енергоефективності та модальній зміні (залізниця замість автотранспорту) [6].

У дослідженні [7] аналізується показник ефективності вантажної системи (Freight System Efficiency, FSE) на основі співвідношення ВВП до викидів парникових газів (GDP/GHG), який застосовується для моніторингу прогресу стратегії California Sustainable Freight Action Plan.

Стаття [8] містить покроковий опис формул і факторів (вага, об'єм, тарифи, додаткові збори), що впливають на загальну вартість перевезення.

Огляд актуальних рішень з автоматизації планування маршрутів, що дозволяють зменшити витрати, скоротити час доставки і мінімізувати викиди, виконано у статті [9]. Джерело [10] розкриває поняття “route efficiency” через системний підхід, а в дисертації [11] запропонована модель багатокритеріального вибору маршруту, яка об'єднує АНР і TOPSIS для аналізу не тільки вартості й часу, а й ризиків, якості сервісу, вимог галузі та особливостей вантажу.

У праці [12] аналізується роль сучасного програмного забезпечення для оптимізації маршрутів із використанням big data, AI, machine learning, тобто автоматизації вибору оптимального шляху, економії пального, мінімізації часу та підвищення задоволеності замовника.

Практичний опис одного з провідних рішень: Route4Me Route Planner, що використовується водіями для багатостадійних перевезень, виконано в [13].

Методика DEA є основою сучасного інструментарію для комплексної оцінки ефективності транспортних мереж, включаючи автопоїзди [14].

У статті [15] порівнюються методи АНР і TOPSIS для прийняття рішень про вибір оптимального місця розташування бізнесу. АНР передбачає побудову ієрархічної структури критеріїв і попарні експертні порівняння, що дозволяє враховувати відносну важливість кожного чинника. Метод оцінює суб'єктивні переваги та забезпечує перевірку на логічну узгодженість рішень. Особливістю TOPSIS є визначення оптимального варіанта на основі близькості до ідеального рішення.

Нині для оцінки МВПОАП застосовують класичні методи (cost-per-mile, ton-mile, Travel Time Index, buffer index) та сучасні методи DEA, АНР, TOPSIS. Також застосовують показники Freight System Efficiency (FSE), програми автоматизації (Route4Me, AI-системи), моделі оцінки ефективності з урахуванням екології, надійності, ризиків та структури вантажу.

**Головні проблеми щодо ефективності МВПОАП:**

1. *Обмеженість критеріїв оцінки* – переважає фокус на витратах і часі, ігноруючи надійність, екологію, безпеку.
2. *Дефіцит достовірних даних* – щодо часу проходження кордонів, об’їздів, попиту.
3. *Регуляторна нестабільність* – геополітичні й митні зміни ускладнюють планування.
4. *Ігнорування погодних та інфраструктурних змін* – не враховуються затори, стан доріг, екологічні обмеження.
5. *Недостатня цифровізація* – неповною мірою використовуються можливості AI, IoT, Big Data.

**Метою дослідження** є розроблення концепції створення експертної моделі оцінки ефективності маршрутів з урахуванням енергетичної, транспортної та дорожньої ефективності дизельних автопоїздів [16; 17; 18] та особливостей транспортної системи США.

**Результати досліджень**

Ефективність маршруту вантажних перевезень визначено на основі застосування десяти критеріїв, які наведені у табл. 1, та особливостей транспортної системи США [19].

Таблиця 1

Критерій	Примітки
C <sub>1</sub> (Вартість)	Мінімізувати
C <sub>2</sub> (Час)	Мінімізувати
C <sub>3</sub> (Ризики/Плата за дорогу)	Мінімізувати
C <sub>4</sub> (Рентабельність)	Максимізувати
C <sub>5</sub> (Використання вантажності)	Максимізувати
C <sub>6</sub> (Довжина ділянок з високою інтенсивністю руху)	Мінімізувати
C <sub>7</sub> (Кількість мостів та тунелів з обмеженням висоти автотранспорту)	Мінімізувати
C <sub>8</sub> (Сумарна висота підйомів та спусків на маршруті)	Мінімізувати
C <sub>9</sub> (Кількість складних поворотів для автопоїзда)	Мінімізувати
C <sub>10</sub> (Ефективність автопоїзда)	Максимізувати

Математична модель розрахунку ефективності маршруту вантажних перевезень на основі перерахованих у табл. 1 критеріїв подається у вигляді:

$$S_{mar} = \sum_{i=1}^{10} w_i N_i, \quad (1)$$

де:  $N_i = \| C_i \|$ ;

$w_i$  – вагові коефіцієнти, які розраховуються методом АНР (лінійна згортка).

Особливістю цієї моделі є використання інтегрального показника енергетичної, транспортної та дорожньої ефективності дизельного автопоїзда, розробленого авторами у працях [16; 17; 18].

Формули нормування чинників:

$$N = \| x \| = (x - x_{min}) / (x_{max} - x_{min}), \quad (2)$$

якщо  $x$  слід максимізувати для збільшення ефективності маршруту та

$$N = \| x \| = (x_{max} - x) / (x_{max} - x_{min}), \quad (3)$$

якщо чинник  $x$  слід мінімізувати для збільшення ефективності маршруту.

Визначення інтегрального показника  $E$  ефективності одноланкового дизельного автопоїзда (тягач+причіп) для виконання міжнародних вантажних перевезень з урахуванням усіх його найважливіших параметрів виконано за формулою (4), обґрунтованою у [18]:

$$E = 0,2109 \cdot \frac{T}{m} + 0,1254 \cdot \frac{\eta \cdot \omega}{I} - 0,0627 \cdot \alpha + 0,1254 \cdot \eta_{tr} - 0,0456 \cdot L_{tr} + \\ + 0,1073 \cdot P_v - 0,0319 \cdot m_k + 0,0609 \cdot J_p - 0,0319 \cdot f + 0,0609 \cdot R_t + \\ + 0,0392 \cdot K_{ss} + 0,0658 \cdot H_{st} + 0,0224 \cdot D_k + 0,0140 \cdot C_a,$$

де:  $T$  – крутний момент двигуна (Н·м); (4)

$m$  – маса двигуна (кг);

$I$  – момент інерції двигуна (кг·м<sup>2</sup>);

$\omega$  – кутова швидкість двигуна (рад/с);

$\alpha$  – кутове прискорення двигуна (рад/с<sup>2</sup>);

$\eta$  – коефіцієнт корисної дії двигуна (безрозмірний);

$\eta_{tr}$  – коефіцієнт корисної дії трансмісії (безрозмірний);

$L_{tr}$  – сумарні втрати потужності в трансмісії (Вт або безрозмірна величина, що відображає відносні втрати);

$P_v$  – вантажопідйомність (макс. маса вантажу);

$m_k$  – маса порожнього кузова;

$J_p$  – жорсткість рами;

$f$  – коефіцієнт опору коченню;

$R_t$  – ресурс шини;

$K_{ss}$  – жорсткість підвіски (англ.: stiffness of the suspension);

$H_{st}$  – хід підвіски (англ.: suspension travel);

$D_k$  – діаметр колеса;

$C_a$  – коефіцієнт зчеплення.

У працях [16; 17; 18] проаналізовано ефективність функціональних систем дизельних автопоїздів, які використовуються у США для міжнародних вантажних перевезень. На основі розробленого авторами інтегрального індексу ефективності дизельного одноланкового автопоїзда встановлено, що найбільш ефективною системою серед таких автопоїздів є модель Freightliner Cascadia 2023.

Цю модель використано для аналізу та визначення ефективності маршруту «Чикаго (ІЛ) – Конкорд (NH)» на основі застосування інтегрального показника ефективності маршруту вантажних перевезень у США, який задається формулою (1). Саме перевезення здійснюється такою моделлю одноланкового автопоїзда Freightliner Cascadia 2023, для якої індекс ефективності автопоїзда  $E = 0,54$ .

**Маршруту № 1 (через I-90 із платними ділянками), табл. 2:**

Таблиця 2

**Маршрут Чикаго (ІЛ) – Конкорд (NH)**

Параметри	Значення
1	2
Маршрут	Через I-90 → Ohio Turnpike → New York Thruway
Відстань	~964 милі (≈1 550 км)
Час у дорозі	16–17 год без зупинок; 18–22 год з урахуванням трафіку

Продовження таблиці 2

1	2
Рельєф	Переважно рівнинний; легкі горбистості ближче до Нью-Гемпшира
Трафік	Високий у зонах Buffalo–Rochester та біля Нью-Йорка
Зони відпочинку	Численні (особливо на I-90/I-80), напр. Oasis біля Чикаго

Фінансові розрахунки, табл. 3:

Таблиця 3

Стаття витрат	Розрахунок	Сума (USD)	Сума (грн)
Пальне	$964 / 6,5 = 148 \text{ гал.} \times \$ 3,90$	\$ 577,20	≈ 23 545 грн
Платні дороги (tolls)	Skyway + Indiana + Ohio + NY Thruway	~\$ 85,00	≈ 3468 грн
Оплата водієві	$964 \times \$ 0,62$	\$ 597,68	≈ 24 400 грн

Загальні витрати  $|\$ 1\,259,88| \approx 51\,400 \text{ грн}$  (за середнім курсом  $\$ 1 \approx 40,80 \text{ грн}$ ).

У ході реалізації основних етапів методу аналітичної ієрархії Т. СААТІ одержано такі результати.

Побудована матриця попарних порівнянь ефективності маршруту.

Для десяти зазначених вище чинників проведені попарні порівняння за шкалою Сааті (від 1 до 9 або їх обернених значень).

Обчислені вагові коефіцієнти та виконана перевірка узгодженості.

Формула інтегрального показника (1)

$$S = 0,0697 \cdot N_1 + 0,0507 \cdot N_2 + 0,0417 \cdot N_3 + 0,2249 \cdot N_4 + 0,3085 \cdot N_5 + \\ + 0,0388 \cdot N_6 + 0,0289 \cdot N_7 + 0,0296 \cdot N_8 + 0,0285 \cdot N_9 + 0,1787 \cdot N_{10}$$

де  $N_i$  – нормалізовані чинники за формулами (2), (3).

**1. Найвпливовіші критерії:** використання вантажності (30,85 %), рентабельність (22,49 %), ефективність автопоїзда (17,87 %).

Перевірка виконання умови узгодженості оцінок експертів за допомогою індексу узгодженості для уникнення суперечливих рішень зроблена за такими формулами.

Індекс узгодженості (CI):

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1), \quad (6)$$

Відношення узгодженості (CR):

$$CR = CI / R, \quad (7)$$

де випадковий індекс узгодженості  $RI = 1,49$  при  $n = 10$ . Матриця попарних порівнянь вважається добре узгодженою, якщо  $CR \leq 0,1$ .

Логічно узгоджена матриця попарних порівнянь з урахуванням важливості критеріїв подана у табл. 4.

Таблиця 4

Критерій	Вартість	Час	Ризики	Рентабельність	Використання в.	Зони інг. руху	Мости / тунелі	Перепади висот	Повороти	Ефективність
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Вартість	1	2	3	1/5	1/7	3	3	2	3	1/6
Час	1/2	1	2	1/6	1/6	2	2	2	2	1/7

Продовження таблиці 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ризики	1/3	1/2	1	1/7	1/7	2	2	2	2	1/6
Рентабельність	5	6	7	1	1/3	6	5	6	5	3
Використання вантажо- підйомності	7	6	7	3	1	5	6	7	6	4
Зони інтенсивності руху	1/3	1/2	1/2	1/6	1/5	1	2	2	2	1/5
Мости/тунелі	1/3	1/2	1/2	1/5	1/6	1/2	1	1	1	1/6
Перепади висот	1/2	1/2	1/2	1/6	1/7	1/2	1	1	1	1/5
Повороти	1/3	1/2	1/2	1/5	1/7	1/2	1	1	1	1/6
Ефективність автопоїзда	6	7	6	1/3	1/4	5	6	5	6	1

## 2. Реалізація перевірки узгодженості:

Наведемо оцінки максимального значення власних чисел  $\lambda_{\max}$  матриці порівнянь та індексу узгодженості  $CI$ :  $\lambda_{\max} = 10,61$ ;

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) = (10,61 - 10) / 9 = 0,619 = 0,068.$$

Числове значення відношення узгодженості  $CR$ :

$$CR = CI / RI = 0,068 / 1,49 = 0,046.$$

## 3. Висновок по узгодженості:

$CR = 0,046 < 0,1$  – матриця попарних порівнянь достатньо узгоджена. Використано отримані ваги для обчислення інтегрального індексу.

Інтегральний індекс ефективності маршруту обчислений за формулою (1):  $E = 0,666$ .

• Для матриці попарних порівнянь отримано  $CR = 0,046 < 0,1$ , отже, оцінки узгоджені.

• Ваги критеріїв розраховані.

• Інтегральний індекс ефективності маршруту № 1 становить **0,666** (з 0 до 1) – досить високий показник ефективності з урахуванням параметрів маршруту.

Розрахунки інтегральних показників ефективності маршрутів № 2, № 3, № 4 виконано за алгоритмом, який використано для розрахунку маршруту № 1. **Реальні вихідні параметри маршруту № 2 (I-80 → Interstate 76 → I-95/I-93), табл. 5.**

Таблиця 5

Параметри	Значення
Відстань	~960–970 миль ( $\approx$ 1 545–1 560 км)
Час у дорозі	~21–22 год (через трафік у Філадельфії, Ньюарку, Бостоні)
Платні дороги (tolls)	• Indiana Toll Road – \$ 15,50 • Ohio Turnpike – \$ 16,50 • NJ/PA Turnpike – \$ 25–28
Трафік	Інтенсивний, особливо у містах Пенсильванії, Нью-Джерсі
Рельєф	Загалом рівнинний, із пагорбистими ділянками в Пенсильванії
Зони з високою інтенсивністю руху	~60 км (густі затори у мегаполісах)
Кількість мостів / тунелів з обмеженнями	4
Сумарні перепади висоти	Орієнтовно 300 м
Кількість складних поворотів	Близько 12
Ефективність автопоїзда	Константа: 0,8 (Freightliner Cascadia 2023)

**Висновок.** Інтегральний показник ефективності маршруту № 2 дорівнює **0,659** (за шкалою від 0 до 1).

Це трохи нижче, ніж для маршруту № 1 (0,666), що відображає більший час, інтенсивність руху і платню за дорогу.

Маршрут № 2 дещо менш ефективний за критеріями, але все одно має доволі високий індекс ефективності (за шкалою від 0 до 1).

**Вхідні параметри маршруту № 3 (через Pittsburgh PA), табл. 6.**

Таблиця 6

Параметри	Значення
Відстань	~990 миль (≈1 593 км)
Час у дорозі	~19–23 год (через рельєф і затори в Cleveland, Pittsburgh)
Платні дороги (tolls)	• Ohio Turnpike – ~\$ 16,50 • Pennsylvania Turnpike (через Pittsburgh) – ~\$ 24–28
Трафік	Інтенсивний у Cleveland та Pittsburgh, можливі затримки
Рельєф	Хвилеподібна гірська місцевість, яка ускладнює рух
Зони відпочинку	Достатньо, але комфорт залежить від складного рельєфу

**Відповідь:**

Інтегральний показник ефективності маршруту № 3 дорівнює **0,634** (за шкалою від 0 до 1).

Це означає, що маршрут є доволі ефективним, хоча й дещо програє маршрутам № 1 (0,666) та № 2 (0,659) через більші перепади висот, можливі затори та час у дорозі. Вартість маршруту вважаємо максимальною через найбільші витрати на пальне та платні дороги.

**Маршрут № 4: Альтернативний маршрут без платних доріг (через локальні/міські ділянки)**

Таблиця 7

Параметри	Значення
Вартість (тільки пальне)	≈ \$ 700 (через об'їзди та довший маршрут)
Платні дороги	Відсутні (плата \$ 0)
Час у дорозі	~22 год (через міські ділянки та обмеження швидкості)
Рентабельність	0,55 (знижена через вищі витрати часу / пального)
Використання вантажопідйомності	0,85
Зони з високою інтенсивністю руху	~65 км (через більшу урбанізованість маршруту)
Кількість мостів/тунелів з обмеженнями	4
Перепади висоти	~350 м (через подрібнений рельєф та об'їзди)
Кількість складних поворотів	~15 (через місцеві дороги та об'їзди)
Ефективність автопоїзда	0,8 (Freightliner Cascadia 2023, як і в інших маршрутах)

**Результат:** Інтегральний показник ефективності маршруту № 4 дорівнює ≈ 0,648 (за шкалою від 0 до 1).

**Отже, встановлено:**

1. Найефективнішим за сукупністю критеріїв (індекс 0,666) є маршрут № 1 (чітка магістраль, оптимальний трафік/відстань, хоч і присутні платні дороги).

2. Маршрут № 4 (повністю без платних доріг) демонструє досить високу ефективність (0,648), хоч дещо поступається маршрутам із магістральними платними сегментами через довший час та підвищене навантаження на локальні дороги.

3. Маршрут № 3 найменш ефективний (0,634) через найбільші витрати на пальне, перепади висот, об'їзди та затори біля Піттсбурга.

4. Якщо найголовніші критерії для компанії – це відсутність додаткових витрат на tolls та юридична коректність вантажного руху, маршрут № 4 є оптимальним.

5. Якщо ключовими є оперативність, прогнозованість часу доставки й зручності для великого автопоїзда, більш вигідні маршрути № 1 та № 2 (але з витратами на платні дороги).

Таблиця 8

**Порівняльна таблиця елементів та інтегральних показників ефективності для чотирьох маршрутів вантажних перевезень у США**

Критерій / Маршрут	№ 1 (I-90 з tolls)	№2(I-80/I-76, частково toll)	№ 3 (I-90 через Pittsburgh)	№ 4 (Toll-free truck-legal)
Вартість (\$)	662,20	633,20	1000 (максимум)	700
Час (години)	20	21	21	22
Платня / ризики (\$)	85	56	45	0
Рентабельність (0–1)	0,6	0,6	0,6	0,55
Використання вантажопідйомності (0–1)	0,85	0,85	0,85	0,85
Зони з високою інтенсивністю руху (км)	50	60	55	65
Кількість мостів / тунелів	3	4	4	4
Перепади висот (м)	200	300	350	350
Кількість складних поворотів	10	12	12	15
Ефективність автопоїзда (0–1)	0,8	0,8	0,8	0,8
<b>Нормоване значення індексу ефективності (0–1)</b>	0,666	0,659	0,634	0,648

Аналіз порівняльної таблиці (табл. 8) дозволяє стверджувати таке:

1. *Застосування методу аналізу ієрархії Саати (АНР)* забезпечує формалізацію процесу прийняття рішень у виборі маршруту, дозволяючи поєднати кількісні та якісні критерії в єдину інтегральну оцінку ефективності.

2. *Порівняльна оцінка чотирьох маршрутів між Чикаго (IL) і Конкордом (NH)* демонструє, що маршрут із платними дорогами (№ 1) виявився найефективнішим (індекс **0,666**), оскільки забезпечує найкраще співвідношення витрат, часу та логістичної зручності. Альтернативний маршрут без платних доріг (№ 4) показав доволі високу ефективність (**0,648**), що робить його доцільним за умов обмеженого бюджету або необхідності уникнення toll-зон.

3. *Виявлено ключові проблеми*, що обмежують точність і адаптивність маршрутного планування: недостатність якісних даних, ігнорування погодних і дорожніх чинників, низький рівень цифровізації процесів.

4. *Запропонована експертно-функціональна модель* ефективності маршрутів з використанням нормування та АНР є придатною для впровадження у системах логістичного планування транспортних компаній.

#### **Висновок**

Розроблена концепція побудови експертно-функціональної моделі оцінки ефективності маршрутів дизельних автопоїздів з урахуванням енергетичної, транспортної та дорожньої ефективності засобів перевезень дає змогу здійснити комплексну оцінку ефективності маршрутів дизельних автопоїздів, інтегруючи критерії енергетичної, транспортної та дорожньої ефективності; ранжувати маршрути дизельних автопоїздів за інтегральним показником ефективності, а також обґрунтовувати вибір оптимальних маршрутів з урахуванням інтегральної ефективності засобів перевезень.

Запропонована концепція експертно-функціональної моделі ефективності маршрутів з використанням нормування та АНР може бути впровадженою у системах логістичного планування транспортних компаній.

#### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Lumenalta. What is freight routing? Guide to efficient routing, types, and benefits for logistics optimization. URL: <https://lumenalta.com/insights/what-is-freight-routing> (дата звернення: 31.07.2025).
2. Мигаль В.Д. Интеллектуальные системы в технической эксплуатации автомобилей : монография. Харьков, 2018. 262 с.
3. McKinnon A. Performance measurement in freight transport: its contribution to the design, implementation and monitoring of public policy. *International Transport Forum Discussion Paper*. 2015. No. 2015-07.
4. Freight Transport and Logistics Masterplan. Federal Ministry for Digital and Transport (BMDV). 2023.
5. Baran J. The efficiency of the road transport sector in Poland and other member states of the European Union. *Scientific Journal of Siedlce University of Natural Sciences and Humanities. Administration and Management Series*. 2014. No. 103. P. 175–201.
6. Woodburn A. An analysis of rail freight operational efficiency and mode share in the British port-hinterland container market : dissertation. London, 2015.
7. Giuliano G., Kang S., Hegde S. Assessment of Freight System Efficiency Measure: GDP/GHG. URL: <https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/research-innovation-system-information/documents/final-reports/ca18-3081-final-report-all.pdf> (дата звернення: 31.07.2025).
8. Beeontrade. Ocean Freight Charges: Factors, Formulas, and Examples. URL: <https://www.beeontrade.com/blog/how-to-calculate-ocean-freight-charges-factors-formulas-and-real-life-examples> (дата звернення: 31.07.2025).
9. HSE Network. Top 10 Route Optimisation Software Providers in 2025. URL: <https://www.hse-network.com/top-10-route-optimisation-software-providers/> (дата звернення: 31.07.2025).

10. Sustainability Directory. Route Efficiency → Term. URL: <https://sustainability-directory.com/term/route-efficiency/> (дата звернення: 31.07.2025).
11. Reinberg S., Torrado López E. Multi-Criteria Decision Making for International Freight Transportation. Uppsala, 2024. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1874953/FULLTEXT01.pdf> (дата звернення: 31.07.2025).
12. NetworkON. Route Optimization Software for Efficient Logistics. URL: <https://networkon.io/resources/blog/route-optimization-software/> (дата звернення: 31.07.2025).
13. Route4Me. Route4Me Route Planner on the App Store. URL: <https://apps.apple.com/us/app/route4me-route-planner/id349853799> (дата звернення: 31.07.2025).
14. Seiford L.M., Thrall R.M. Components of efficiency evaluation in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*. 1994. Vol. 80. No. 3. P. 500–509. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00131-U](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00131-U).
15. Rahman M. Comparative analysis of AHP and TOPSIS methods in retail business location selection decision support system. *Journal Electrical and Computer Experiences*. 2024. Vol. 2. No. 2. P. 52–57. URL: <https://jurnal.tintaemas.id/index.php/jece/article/download/355/285/2585> (дата звернення: 31.07.2025).
16. Приходько В. Оцінювання енергоефективності сучасних автопоїздів для міжнародних вантажних перевезень. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. Луцьк : ЛНТУ, 2025. С. 355–366.
17. Приходько В.Е. Знаходження інтегрального індексу енергетичної і транспортної ефективності для підвищення функціонування одноланкових автопоїздів у міжнародному сполученні. *Вісник ХНТУ*. 2025. С. 26–41.
18. Вікович І., Приходько В. Побудова інтегрального індексу енергетичної і транспортної та дорожньої ефективності автопоїздів для міжнародних вантажних перевезень. *Вісник ВНТУ*. 2025. № 5. С. 145–152.
19. Вікович І.А., Обшта А.Ф., Приходько В.Е. Економічна ефективність вантажних перевезень одноланковими автопоїздами в транспортних коридорах США. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Том 36 (75). № 4. С. 280–286.

## REFERENCES

1. Lumenalta. (n.d.). *What is freight routing? Guide to efficient routing, types, and benefits for logistics optimization*. Retrieved July 31, 2025, from: <https://lumenalta.com/insights/what-is-freight-routing>.
2. Myhal, V.D. (2018). *Intelligent systems in the technical operation of automobiles: A monograph* [Интеллектуальні системи в технічній експлуатації автомобілів: Монографія]. Kharkiv: Maidan [in Ukrainian].

3. McKinnon, A. (2015). Performance measurement in freight transport: Its contribution to the design, implementation and monitoring of public policy. *International Transport Forum Discussion Paper*, No. 2015-07.
4. Federal Ministry for Digital and Transport. (2023). *Freight transport and logistics masterplan*.
5. Baran, J. (2014). The efficiency of the road transport sector in Poland and other member states of the European Union. *Scientific Journal of Siedlce University of Natural Sciences and Humanities. Administration and Management Series*. (103). 175–201.
6. Woodburn, A. (2015). *An analysis of rail freight operational efficiency and mode share in the British port-hinterland container market*: Master's thesis, University of Westminster.
7. Giuliano, G., Kang, S., & Hegde, S. (2021). *Assessment of freight system efficiency measure: GDP/GHG*. California Department of Transportation. July 31 2025. URL: <https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/research-innovation-system-information/documents/final-reports/ca18-3081-final-report-a11y.pdf>
8. Beeontrade. (2023, April 28). *Ocean freight charges: Factors, formulas, and examples*. July 31 2025. URL: <https://www.beeontrade.com/blog/how-to-calculate-ocean-freight-charges-factors-formulas-and-real-life-examples>
9. HSE Network. (2025, March 11). *Top 10 route optimisation software providers in 2025*. July 31 2025. URL: <https://www.hse-network.com/top-10-route-optimisation-software-providers/>
10. Sustainability Directory. (2025, April 4). *Route efficiency → Term*. July 31 2025. URL: <https://sustainability-directory.com/term/route-efficiency/>
11. Reinberg, S., & Torrado López, E. (2024). *Multi-criteria decision making for international freight transportation*. Uppsala University. July 31 2025. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1874953/FULLTEXT01.pdf>
12. NetworkON. (2025, February 11). *Route optimization software for efficient logistics*. July 31 2025. URL: <https://networkon.io/resources/blog/route-optimization-software/>
13. Route4Me. (2021). *Route4Me Route Planner on the App Store*. July 31 2025. URL: <https://apps.apple.com/us/app/route4me-route-planner/id349853799>
14. Seiford, L.M., & Thrall, R.M. (1994). Components of efficiency evaluation in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 80 (3). 500–509. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00131-U](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00131-U).
15. Rahman, M. (2024). Comparative analysis of AHP and TOPSIS methods in retail business location selection decision support system. *Journal of Electrical and Computer Experiences*. 2 (2). 52–57. July 31, 2025. URL: <https://jurnal.tintaemas.id/index.php/jece/article/download/355/285/2585>.
16. Prykhodko, V. (2025). Assessment of Energy Efficiency of Modern Road Trains for International Freight Transportation. *Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport*. Lutsk : LNTU. Pp. 355–366.

17. Prykhodko, V.E. (2025). Determining the Integral Index of Energy and Transport Efficiency to Improve the Operation of Single-Link Road Trains in International Transport. *KhNTU Bulletin*. 26–41.
18. Vikovych, I., Prykhodko, V. (2025). Development of an Integral Index of Energy, Transport, and Road Efficiency of Road Trains for International Freight Transportation. *VNTU Bulletin*. 5. 145–152.
19. Vikovych, I.A., Obshta, A.F., Prykhodko, V.E. (2025). Economic Efficiency of Freight Transportation by Single-Link Road Trains in U.S. Transport Corridors. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky TNU. Series: Technical Sciences*. 36 (75). No. 4. 280–286.

Дата першого надходження статті до видання: 20.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.11.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті: 26.12.2025

**SUSTAINABLE DEVELOPMENT: A REVIEW OF POLICIES  
AND PRACTICES OF EUROPEAN INTERMODAL COMPANIES**

**O.L. Drozhzhyn<sup>1</sup>, F.A. Volianskyi<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Ph. D. (Transport Systems), Ass. Prof. of the Department of Fleet Operation and Maritime  
Transport Technologies,

*Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-9695-9296*

<sup>2</sup>Postgraduate of Fleet Operation and Maritime Transport Technologies,  
*Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,  
ORCID ID: 0009-0008-7589-6581*

**Summary**

**Introduction.** *This article explores the alignment of European intermodal transportation companies with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs) as part of the global sustainability agenda. In the context of increasing attention to sustainable development, transport companies have begun actively integrating the SDGs into their operational strategies. These efforts reflect a growing recognition that logistics chains must not only be economically efficient but also environmentally responsible and socially inclusive.*

**The primary aim** of this research is to examine the extent and nature of sustainable development initiatives among intermodal transport operators across Europe. Using a Case Study Research methodology, the study analyzes 123 companies, both signatories of the UN Global Compact and those that independently commit to sustainability principles. The analysis identifies ten key areas of activity – such as decarbonization, safety, gender equality, waste management, and anti-corruption – through which companies engage with the SDGs.

**The findings** reveal that the most systematic and ambitious sustainability practices are pursued by large multinational corporations such as Maersk, CMA CGM, and Kuehne + Nagel. These companies have sufficient resources to invest in innovative technologies, digitalization, responsible procurement, and diversity initiatives. In contrast, smaller operators tend to adopt more flexible approaches, selecting specific SDG targets that align closely with their business capacities and market conditions. Despite the lack of a unified framework for sustainability implementation across the sector, many firms have successfully integrated ethical standards, environmental safeguards, and inclusive labor policies into their value chains.

The study **concludes** that intermodal transport is a critical enabler of sustainable development, particularly in the areas of climate action, decent work, and responsible production. However, effective implementation of sustainability goals requires not only corporate commitment but also collaborative action through international alliances and coalitions. As such, partnerships – such as the Clean Cargo Working Group, the Getting to Zero Coalition, and the Maritime Anti-Corruption Network play an essential role in advancing global SDG progress within the transport sector. This

*paper underscores the importance of multidimensional, adaptable strategies tailored to each company's operational context and global sustainability trends.*

**Key words:** *intermodal transportation, sustainable development, SDGs, liner shipping, maritime transport, container delivery.*

## СТАЛИЙ РОЗВИТОК: ОГЛЯД ПОЛІТИК ТА ПРАКТИКИ ЄВРОПЕЙСЬКИХ ІНТЕРМОДАЛЬНИХ КОМПАНІЙ

О.Л. Дрожжин<sup>1</sup>, Ф.А. Волянський<sup>2</sup>

<sup>1</sup>к.т.н. (транспортні системи), доцент кафедри експлуатації флоту та технології морських перевезень,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-9695-9296

<sup>2</sup>аспірант кафедри експлуатації флоту та технології морських перевезень,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0009-0008-7589-6581

### Анотація

**Вступ.** У статті досліджується відповідність європейських компаній, що здійснюють інтермодальні перевезення, цілям сталого розвитку (ЦСР), визначеним Організацією Об'єднаних Націй, як складника глобального порядку денного сталого розвитку. В умовах зростаючої уваги до принципів сталого розвитку транспортні компанії дедалі активніше інтегрують ЦСР у свої операційні стратегії. Такі зусилля свідчать про усвідомлення того, що транспортні ланцюги мають бути не лише економічно ефективними, а й екологічно відповідальними та соціально інклюзивними.

**Метою** дослідження є оцінка масштабу та характеру впровадження ініціатив сталого розвитку серед операторів інтермодальних перевезень у Європі. Методом кейс-дослідження проаналізовано діяльність 123 компаній, як учасників Глобального договору ООН, так і тих, хто самостійно реалізує політику сталого розвитку. Виділено десять основних напрямів діяльності компаній, через які реалізуються відповідні ЦСР, зокрема декарбонізація, безпека, тендерна рівність, управління відходами та антикорупційні заходи.

**Результати** дослідження показують, що найпоширеніші та найамбітніші практики впроваджуються великими транснаціональними корпораціями, такими як Maersk, CMA CGM та Kuehne + Nagel. Такі компанії мають досить ресурсів для інвестування в інноваційні технології, цифровізацію, відповідальні закупівлі та програми з інклюзивності. Менші оператори, своєю чергою, застосовують гнучкий підхід, вибираючи ті цілі, що найбільше відповідають їхнім операційним можливостям і ринковим умовам. Незважаючи на відсутність єдиного стандарту впровадження сталих практик, багато компаній уже успішно інтегрували етичні норми, екологічні стандарти та політики соціальної відповідальності у свої логістичні ланцюги.

Зроблено **висновок**, що інтермодальні перевезення відіграють ключову роль у досягненні цілей сталого розвитку, зокрема у сферах кліматичних дій, гідної праці та відповідального виробництва. Проте ефективне впровадження ЦСР потребує не лише зусиль окремих компаній, а і спільних дій через участь

у міжнародних ініціативах і коаліціях. Партнерства на кшталт *Clean Cargo Working Group*, *Getting to Zero Coalition* та *Maritime Anti-Corruption Network* мають вирішальне значення для глобального прогресу у сфері сталого транспорту. У статті підкреслюється важливість багатовимірних і адаптивних стратегій, які враховують як операційний контекст компаній, так і світові тенденції сталого розвитку.

**Ключові слова:** інтермодальні перевезення, сталий розвиток, ЦСР, лінійні перевезення, морський транспорт, доставка контейнерів.

**Introduction.** The Sustainable Development Goals (SDGs) were adopted by all United Nations member states with the aim of achieving them by 2030, in accordance with the “2030 Agenda for Sustainable Development” [2]. The SDGs serve as a framework for governments to enhance the sustainability of their societies and, ultimately, the world as a whole. However, various organizations and international transport companies have begun to interpret and implement the SDGs differently, using them as tools for analyzing and shaping internal policies to align with this global agenda. The SDGs are intended to help companies assess different aspects of their business models in order to identify potential risks and develop strategies for their mitigation or elimination. This approach allows businesses to prioritize specific goals according to their operational profiles and focus on addressing related challenges.

The intermodal container transportation system incorporates several dimensions that can be classified as priorities from a sustainable development perspective.

Sustainable development in the context of intermodal transport is viewed through the lens of establishing principles not only for the operation of the intermodal operator itself but also for the selection criteria of partner companies (agents, actual carriers, terminal operators, and other third parties). These principles include:

- economic – efficient and responsible use of resources, aimed at ensuring long-term profitability and viability of the intermodal business;
- environmental – reduction of waste and carbon footprint during intermodal deliveries and maximization of energy efficiency to minimize negative impacts on the environment (e.g., pollution and global warming);
- social – focus on initiatives such as safety, health, diversity, and inclusiveness among intermodal company employees to foster healthier and more self-sufficient communities.

**Literature review.** The first academic publications dedicated to sustainable development in the transport sector began to emerge in the late 1980s and early 1990s, following the rise in popularity of the sustainability concept after the release of the “Our Common Future” report, widely known as the Brundtland Report [1], by the World Commission on Environment and Development. Alongside initial attempts to define sustainable development, early scholarly works appeared in the context of the transport industry, including the contributions of D. Banister, D. Gordon, P. Nijkamp, J. Whitelegg, and S. Owens [2–6].

This review is based on the analysis of the activities of leading intermodal container operators and their alignment with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs). These SDGs were established by the UN in 2015 as a “universal call to action to end poverty, protect the planet, and improve the lives and prospects of everyone, everywhere” [7].

Today, the topic of sustainable development in transportation is examined from various perspectives: global frameworks, maritime shipping, individual SDGs, regional strategies, and case-based analyses. For instance, the sustainability strategies of container shipping companies have been addressed in works such as [12–15], while other studies explore the implementation of sustainability principles in specific seaports across different regions, including: Finland [16], Brazil [17], Indonesia [18], Greece [19], South Korea [20], the United Kingdom [21], Taiwan (Kaohsiung) [22–23], the Netherlands (Amsterdam) [24], Spain (Port of Barcelona) [25], Vietnam (25 ports) [26], and Canada (18 ports) [27].

The diversity and volume of highly cited publications on sustainable transportation, along with the emergence of dedicated academic journals addressing shipping-related sustainability issues, clearly demonstrate a growing academic and professional interest in this subject area.

**Research area and methodology.** Unfortunately, the direct implementation of the general transport-related SDGs outlined in [34] as a roadmap for intermodal transport companies is not entirely feasible due to the following reasons:

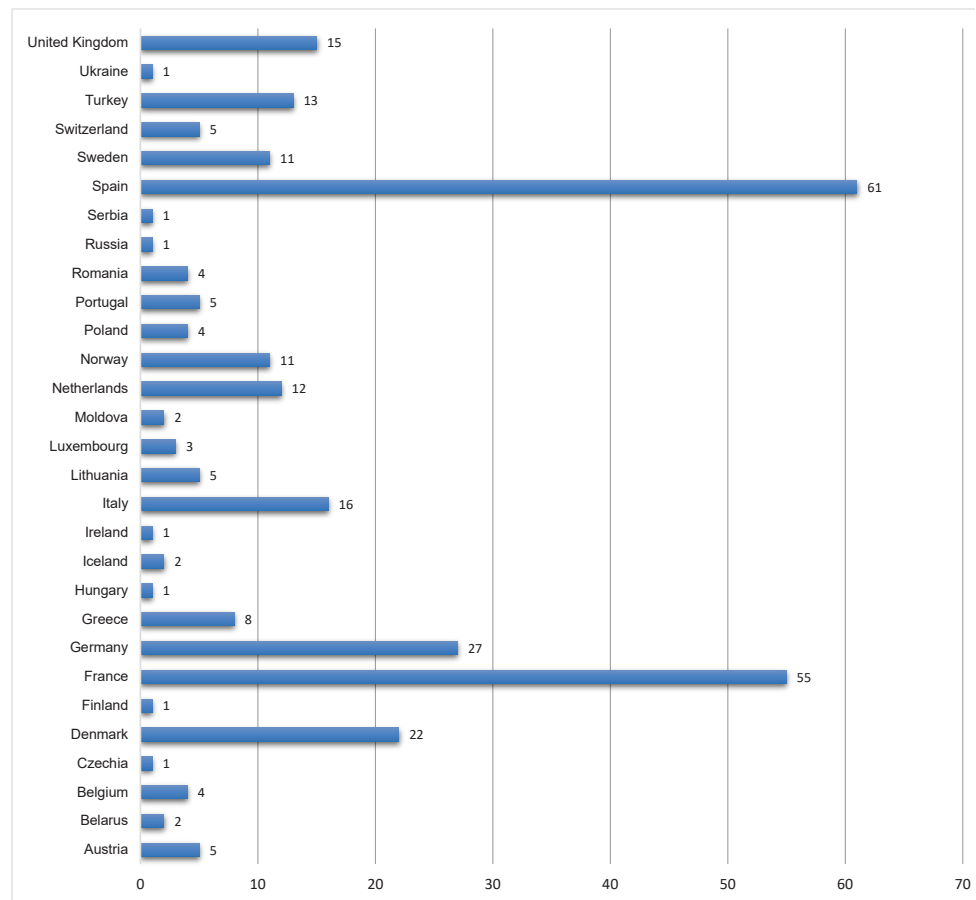
- the specific nature of intermodal transport companies lies in freight operations, which inherently limits their ability to support targets associated with passenger mobility (e.g., SDG 11.2 – access to safe, affordable public transport, and SDG 3.6 – reducing traffic-related deaths and injuries);
- the diversity among intermodal transport companies – in terms of resource availability, financial capacity, operational profiles, workforce size, and geographic scope – allows them to selectively adopt SDGs that are aligned with their capabilities and priorities;
- an intermodal company may commit to sustainable development objectives either formally (e.g., by signing the UN Global Compact) or informally by voluntarily integrating sustainability principles into their operations without external declarations.

Fig. 1 presents the number of European transport companies (sector: “Industrial Transportation”) that have joined the UN Global Compact as of May 2025, indicating their formal alignment with the sustainable development agenda.

Among the listed signatories, the leading countries are France, Germany, and Denmark. However, it is evident that only a portion of all transport companies included in the statistics actually provide intermodal services.

The analysis of intermodal transport companies’ engagement in sustainable practices was conducted using the Case Study Research (CSR) approach. A total of 123 European companies were studied, including both signatories of the UN Global Compact and those that independently commit to sustainability principles. The study focused on annual and sustainability reports of intermodal operators headquartered in EU countries, aiming to assess the scope and focus of their sustainability-oriented business activities.

**Presentation of the main research material.** As previously noted, companies independently define the hierarchy of priorities, identifying which tasks are most relevant to their business, and where they can exert influence and bear responsibility for mitigating negative impacts.



*Fig. 1. European countries whose intermodal transport companies have joined the UN Global Compact initiative as of May 2025*

All SDG-related initiatives of a particular company can be broadly classified into three categories:

- areas with a high potential for large-scale positive impact;
- areas where the company sees an opportunity for direct or indirect positive contribution;
- areas where there is potential to minimize or prevent negative consequences.

This paper identifies ten key fields of activity for intermodal transport companies (Fig. 2), through which their alignment with the Sustainable Development Goals (SDGs) is examined: establishing sustainable intermodal chains; decarbonization programs; security; responsible ships recycling; supporting diversity and inclusion; employee-employer relations policies; responsible procurement; air emissions; protecting ocean health/spills preventing; anti-corruption.

**Application of Intermodal Supply Chains.** The implementation of intermodal supply chains contributes to the achievement of several United Nations Sustainable Development Goals (SDGs). The creation of sustainable intermodal connections is directly aligned with SDGs 8.2, 8.3, 8.5, 9.3, 12.3, 17.10, and 17.16.

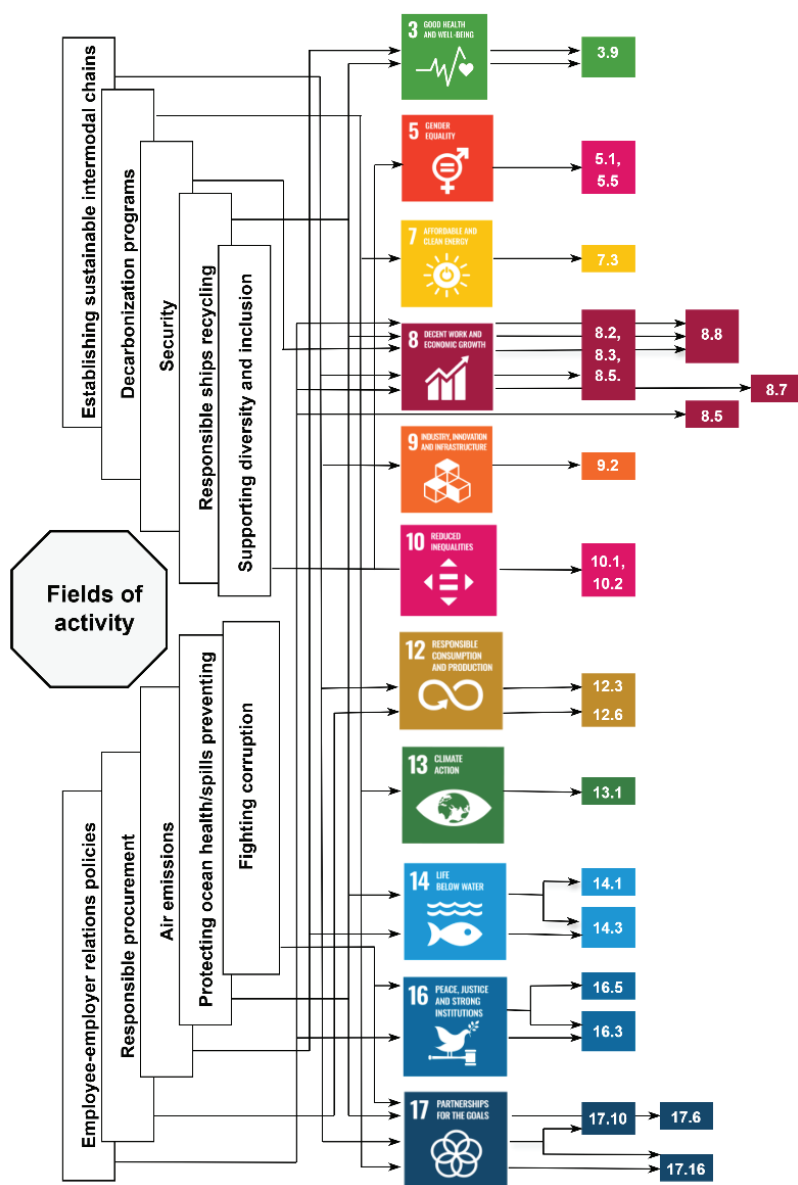


Fig. 2. Intermodal fields of activities and SDS's (Source: Compiled by the authors)

For example, the TradeLens platform (developed by IBM and GTD Solution, a division of Maersk) enabled integration of over 220 organizations, including ocean carriers, ports, and terminals, providing access to data representing nearly half of global containerized seaborne trade. Maersk is also planning two pilot projects within a multilateral initiative aimed at automating advance cargo information for developing countries (SDGs 17.10, 17.16) [22].

More than 4.000 active clients of Twill/Maersk Go and nearly 1.700 participants in its webinars and coaching programs have been recorded. Additionally, Maersk has invested in 21 start-ups supporting small and medium-sized enterprises (SMEs) in trade

facilitation, reaching over 15.000 clients. Trade procedure reform support was provided in 10 countries. Its cold chain logistics business serves hundreds of clients in nearly 50 countries (SDG 17.6). Communication with small businesses is facilitated through the Maersk Mobile App (SDG 8.2).

In 2024, CMA CGM introduced TANGRAM, a program consisting of three core modules: Artificial Intelligence (with BCG University), Leadership (with HEC Paris), and Climate (with Imperial College London), contributing to SDG target 8.5. In the same year, the company launched the *She Sails* program, aimed at promoting maritime careers for women, with the goal of having 500 female crew members by 2026 (SDGs 17.10, 8.3).

**Decarbonization Programs.** Regulatory frameworks – particularly in the European Union – are evolving in response to climate change, with a focus on sustainability and decarbonization. Business entities engaged in intermodal transport are implementing decarbonization strategies aligned with SDGs 7.3, 13.1, and 17.16.

The main contributions to energy efficiency stem from various initiatives, including fleet modernization, deployment of energy monitoring systems, and optimization of transport operations. For instance, Maersk utilizes the Star Connect monitoring system installed on all vessels, enabling real-time tracking of engine performance. This data assists crews in selecting optimal, fuel-efficient routes (SDG 7.3).

ZIM has set a target to reduce its carbon intensity (g CO<sub>2</sub>/TEU-km) by 30 % by 2025 compared to the 2021 baseline. To enhance resilience and adaptation to climate-related disruptions (SDG13.1), ZIM identified five major climate risks for monitoring: Sea-level changes; Regulatory developments; IMO Carbon Intensity Indicator (CII); Extreme weather events; Inaccurate greenhouse gas (GHG) emissions management.

CMA CGM has committed to achieving net-zero carbon emissions across all operations by 2050 and set two intermediate targets in maritime transport: a 30 % reduction in GHG emissions by 2030 and an 80 % reduction by 2040 (compared to 2008 levels). Moreover, the company adopted a strategic modal shift: 70 % of intermodal road transport operations were transitioned to lower-carbon options such as rail and barge.

A strong example of collaborative sustainable development is the joint initiative among intermodal companies such as Kuehne + Nagel, CMA CGM (which owns CEVA Logistics), and PSA (a co-owner of Loconi Intermodal S.A.). These entities are engaged in joint R&D efforts with 20 industrial partners within the Coalition for the Energy of the Future, aiming to accelerate the energy transition in global supply chains (SDG 17.16).

**Safety.** In the context of intermodal transport companies, safety issues – particularly in relation to SDG 8.8 – are of critical importance, given the sector's reliance on a diverse and often vulnerable workforce. This includes drivers, dockworkers, equipment operators, third-party personnel, and subcontractors across various transport modes and intermodal nodes.

Safety measures typically involve the deployment of real-time monitoring systems on cranes and forklifts, as well as the organization of hazard identification and emergency response training sessions. These measures form part of integrated corporate Health, Safety, Security, Environmental, and Quality (HSSE) management systems.

The intermodal transport sector operates using both directly employed staff under formal labor contracts and outsourced services from third parties. In both cases, ethical labor standards must be maintained – ensuring fair remuneration, social protection, and the right to participate in trade unions or labor committees. Since a significant portion of intermodal operations is executed through partner companies, adherence to common business ethics across the value chain is crucial.

Notable examples of codified partnership standards include the DB Code of Conduct for Business Partners [24], the Kuehne+Nagel Supplier Code of Conduct [25], and Hupac Intermodal's ethical guidelines [26]. These documents incorporate provisions prohibiting forced and child labor, upholding freedom of association, enforcing fair wages, and setting environmental criteria for logistics partners. They also address migrant worker rights, compliance with international labor standards (ILO, UNGP), workplace safety, and anti-corruption policies.

Leading intermodal operators are increasingly implementing mentorship programs for women in operational roles and are creating inclusive environments tailored to their needs. These efforts include the provision of gender-specific personal protective equipment (PPE), anti-harassment policies, and initiatives to ensure equal access to job opportunities and career advancement.

**Responsible Ship Recycling.** Ship recycling initiatives are typically undertaken by major intermodal transport operators that own and manage maritime fleets. These programs support the achievement of SDGs 8.8, 14.1, and 17.16. They are implemented under internal frameworks such as the Maersk Responsible Ship Recycling Standard and the MSC Ship Recycling Policy, in accordance with the 2009 Hong Kong International Convention for the Safe and Environmentally Sound Recycling of Ships, the conventions of the International Labour Organization (ILO), the United Nations Guiding Principles on Business and Human Rights (UNGP), and the OECD Guidelines for Multinational Enterprises.

**Promoting Diversity and Inclusion.** This area of activity aligns with SDGs 5.1, 5.5, 10.2, and 10.3. Some of the most impactful diversity initiatives are found in sectors traditionally dominated by male workforces. For instance, gender equality policies at Rail Cargo Group (RCG) – primarily operating in the railway sector – have increased the proportion of women in the workforce to 20.5 %, with women occupying 13 % of management roles in Austria and 19 % abroad. Furthermore, 45 % of trainees at RCG are women [29].

Hellmann Worldwide Logistics has established a representative body for employees with severe disabilities and actively develops tailored integration solutions for candidates and employees with disabilities [30]. Maersk is recognized for its consistent efforts in building an inclusive and respectful environment for LGBTQIA+ colleagues [31].

The CFL Group prioritizes diversity and equal career opportunities for all employees. It is a signatory of the Luxembourg Diversity Charter (IMS – Inspiring More Sustainability) and the Women in Rail agreement [32]. CFL has published a Gender Equality Policy and developed a multi-year action plan addressing recruitment, career development, work-life balance, and the prevention of sexual harassment and sexism. The company adheres strictly to the MEGA (Ministry of Gender Equality and Diversity) positive action approach.

**Employer–Employee Relations Policies.** In intermodal transport companies, employer–employee relations policies are most closely associated with SDGs 8.5, 8.7, 8.8, and 16.3. These initiatives often intersect with diversity and inclusion strategies, as they are aimed not only at external stakeholders but also at the internal workforce of the companies themselves.

CEVA Logistics provides an illustrative example of robust and measurable internal equality policies. The company tracks and discloses several performance indicators, including the base salary gap between women and men (score: 38/40), individual differences in salary increases (20/20), disparity in promotion rates (10/15), and the percentage of employees receiving salary increases after returning from parental leave (15/15).

A key example of SDG 8.5 in practice is the Maersk Academy, a centralized resource center offering training and mentorship programs to empower employees to meet business goals while advancing their careers. Leadership development initiatives provide managers with tools to guide teams effectively while fostering inclusive talent pipelines.

In alignment with SDG 8.6, intermodal companies strictly prohibit child labor and affirm their compliance with international standards on children’s rights. This commitment is documented in several policies and codes, such as the MSC Code of Business Conduct, Kuehne+Nagel Modern Slavery Statement, Hellmann Code of Conduct, Hupac Code of Conduct, and CEVA Logistics Statement on Fighting Against Forced Labour and Child Labour in Supply Chains.

**Responsible Procurement Policies.** According to SDG 12.6, it is recommended, particularly for large and multinational enterprises, to adopt sustainable production practices and to report on efficient resource use. Intermodal companies integrate responsible procurement policies by embedding sustainability principles throughout the value chain.

These practices are supported through the digitization and standardization of procurement processes, with particular focus on decarbonization, occupational safety, and human and labor rights. Strategic sourcing efforts aim to ensure that suppliers uphold environmental and social standards consistent with corporate sustainability goals.

**Air emissions.** Efforts to reduce air emissions support SDG 3.9, which seeks to minimize deaths and illnesses caused by hazardous chemicals and air, water, and soil pollution. A notable example of coordinated efforts in this direction is the joint initiative by CEVA Logistics, ENGIE, and SANEF to establish the European Clean Transport Network (ECTN). This alliance is focused on deploying charging infrastructure for heavy-duty trucks along highways, powered by low-carbon fuels such as biogas, hydrogen, and electricity [34].

Hapag-Lloyd has partnered with the environmental organization One Earth – One Ocean to combat marine pollution. The company operates specialized maritime waste collection vessels, such as SeeHamster and SeeKühe, tasked with the removal of oil, chemicals, and plastic waste from global waterways [35].

SDG target 14.1 is addressed through corporate standards aimed at preventing and reducing marine pollution, as well as active participation in global initiatives. Several intermodal operators, including DB Schenker, MSC, Kuehne+Nagel, Hapag, and CMA CGM, collaborate with Ocean Conservancy [36], and are members of the Clean Cargo Working Group (CCWG) [37].

**Ocean Protection incl. Spill Prevention.** Activities in this area support not only SDGs 3.9 and 14.1 but also 14.3, through the promotion of effective regulations on marine resource extraction, reduction of harmful emissions, and the adoption of environmentally friendly technologies.

These efforts are also closely linked to SDG 17.6, which emphasizes the importance of international scientific and technological cooperation for sustainable development. Intermodal companies engage in global alliances and partnerships such as the Clean Cargo Working Group, Digital Container Shipping Association (DCSA), Getting to Zero Coalition, and the Global Centre for Maritime Decarbonization (GCMD). Initiatives like the Hydrogen Council and the European Clean Hydrogen Alliance foster innovation and low-emission transport solutions.

These companies also contribute to North–South, South–South, and triangular cooperation initiatives, including the Maritime Just Transition Task Force and Mercy Ships. Moreover, they participate in monitoring programs and contribute to international data reporting platforms, including those coordinated by the United Nations [38].

**Anti-Corruption Initiatives.** Intermodal companies reinforce SDG 16.3 by promoting the rule of law through the development of employee codes of conduct and ensuring compliance with legal and ethical standards. Target 16.5 is supported through strict anti-corruption policies that prohibit facilitation payments and all forms of bribery.

These measures are further implemented through participation in global frameworks such as the Maritime Anti-Corruption Network (MACN), which includes members like Maersk, CMA CGM, and MSC [39]. Employee training programs and supply chain risk assessments strengthen the integrity of business operations. Global partnerships (SDG 17.16) are advanced through supplier engagement and participation in anti-corruption and compliance networks worldwide.

**Conclusions.** Intermodal transportation plays a crucial role in advancing the United Nations Sustainable Development Goals, particularly in areas such as energy efficiency, emissions reduction, gender equality, inclusion, and safe working conditions. However, the practical implementation of these goals varies depending on company size, business profile, and degree of engagement in global initiatives.

A systemic integration of sustainable practices is most commonly observed among large transnational corporations such as Maersk, CMA CGM, and Kuehne + Nagel, which possess the resources to invest in innovation, decarbonization, digitalization, and social initiatives. The majority of intermodal transport companies tend to adopt a flexible approach to the SDGs, selecting targets that best align with their business models. This reflects the absence of a unified standard for sustainability implementation across the intermodal sector.

Sustainability efforts are most effectively pursued through partnership-based initiatives, corporate codes of conduct, ethical procurement policies, and participation in international coalitions such as the Clean Cargo Working Group, the Getting to Zero Coalition, and the Maritime Anti-Corruption Network (MACN).

Based on the review of intermodal practices and policies, 6/10 aforesaid fields of activity (Fig. 1), with a high level of impact on sustainable development and a low level of implementation. Among them: 1) measures to comply with the principles

of decent work, equal opportunities and inclusion are mainly applied to in-house personnel. Contractors often have uncontrolled social standards; 2) the focus on global decarbonization shifts attention from noise pollution and air quality in ports/terminals, which has a negative impact on local communities; 3) responsible use of resources (reuse of containers, recycling of packaging, recycling of materials) is developing slowly, although it is declared in the policies of many companies; 4) sustainable development strategies rarely include systemic protection of intermodal infrastructure from extreme weather events, rising sea levels and other climate threats; 5) low-level of application of “green” financial instruments for infrastructure modernization; 6) despite the growth in the number of published reports, there is still no single standard of transparency, and the indicators are often incomplete and/or incomparable.

### REFERENCES

1. Brundtland, G.H. (1987). Our Common Future – Call for Action. *Environmental Conservation*. 14 (4). 291–294. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0376892900016805>.
2. Banister, D. (1992). Energy use, transport and settlement patterns. In M.J. Breheny (Ed.), *Sustainable Development and Urban Form* (pp. 160–181). London, UK : Pion.
3. Gordon, D. (1995). Sustainable Transportation: What Do We Mean and How Do We Get There? In D. Sperling & S. A. Shaheen (Eds.), *Transportation and Energy: Strategies for a Sustainable Transportation System* (pp. 1–11). Washington, DC : American Council for an Energy-Efficient Economy.
4. Nijkamp, P. (1994). Roads toward environmentally sustainable transport. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 28 (4). 261–271. DOI: [https://doi.org/10.1016/0965-8564\(94\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0965-8564(94)90002-7).
5. Whitelegg, J. (1993). *Transport for a sustainable future: The case for Europe*. London, UK : Belhaven Press.
6. Owens, S. (1995). From ‘predict and provide’ to ‘predict and prevent’?: Pricing and planning in transport policy. *Transport Policy*. 2 (1). 43–49. DOI: [https://doi.org/10.1016/0967-070X\(95\)93245-T](https://doi.org/10.1016/0967-070X(95)93245-T).
7. UNDP. (n.d.). Sustainable development goals. URL: <https://www.undp.org/sustainable-development-goals>.
8. United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development (A/RES/70/1). URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>.
9. Acciaro, M. (2011). Pricing in sustainable global container transport. *International Journal of Decision Sciences, Risk and Management*. 3 (3). 293–310.
10. Pawlik, T., Gaffron, P., & Drewes, P.A. (2012). Corporate social responsibility in maritime logistics. In D.-W. Song & P.M. Panayides (Eds.), *Maritime Logistics* (pp. 205–226). Bingley, UK : Emerald. DOI: <https://doi.org/10.1108/9781780523415-011>.

11. Acciaro, M. (2015). Corporate responsibility and value creation in the port sector. *International Journal of Logistics Research and Applications*. 18 (3). 291–311. DOI: <https://doi.org/10.1080/13675567.2015.1027150>.
12. Di Vaio, A., Varriale, L., Lekakou, M., & Stefanidaki, E. (2021). Cruise and container shipping companies: A comparative analysis of sustainable development goals through environmental sustainability disclosure. *Maritime Policy & Management*. 48 (2). 184–212.
13. Agudelo, M.A.L. (2017). Strategic corporate social responsibility in the container shipping industry: A case study of the Triple E as part of Maersk's sustainability strategy (Doctoral dissertation).
14. Motlagh, H.R.S. (2020). Study the role of maritime energy management in achieving the United Nations Sustainable Development Goals (UN SDGs), in particular, Goal 7, in Oman maritime community. *Sustainable Marine Structures*. 2 (2). 1–12.
15. Kornowski, P. (2023). Towards sustainable shipping: The adoption of UN's Sustainable Development Goals (SDGs) in the maritime container shipping industry (Master's thesis, Universidade Católica Portuguesa).
16. Lähdeaho, O., Hilmola, O.P., & Kajatkari, R. (2020). Maritime supply chain sustainability: South-East Finland case study. *Journal of Shipping and Trade*. 5 (1). 1–15.
17. Cunha, D.R., Pereira, N.N., de Santana Porte, M., et al. (2024). Sustainability practices for SDGs: A study of Brazilian ports. *Environment, Development and Sustainability*. 26. 9923–9944. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03126-y>.
18. Al Amien, D., Setyani, F.D., & Sihombing, R. (2020, December). Sustainable port planning in future Indonesian ports: A case study of Mafa Port based on UN SDGs. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 618 (1). 012041.
19. Argyriou, I., Daras, T., & Tsoutsos, T. (2022). Challenging a sustainable port: A case study of Souda port, Chania, Crete. *Case Studies on Transport Policy*. 10 (4). 2125–2137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.09.007>.
20. Roh, S., Thai, V.V., Jang, H., & Yeo, G.T. (2021). The best practices of port sustainable development: A case study in Korea. *Maritime Policy & Management*. Advance online publication. DOI: <https://doi.org/10.1080/03088839.2021.1979266>.
21. Asgari, N., Hassani, A., Jones, D., & Nguyen, H.H. (2015). Sustainability ranking of the UK major ports: Methodology and case study. *Transportation Research*. Part E. 78. 19–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.01.014>.
22. Berechman, J., & Tseng, P.H. (2012). Estimating the environmental costs of port related emissions: The case of Kaoshiung. *Transportation Research*. Part D. 17 (1). 35–38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.09.009>.
23. Chang, C.C., & Wang, C.M. (2012). Evaluating the effects of green port policy: Case study of Kaoshiung Harbour in Taiwan. *Transportation Research*. Part D: Transport and Environment. 17 (3). 185–189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.11.006>.

24. Wiegmans, B. W., & Louw, E. (2011). Changing port-city relations at Amsterdam: A new phase at the interface? *Journal of Transport Geography*. 19 (4). 575–583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2010.06.007>.
25. Villalba, G., & Gemechu, E.D. (2011). Estimating GHG emissions of marine ports – the case of Barcelona. *Energy Policy*. 39 (3). 1363–1368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.12.008>.
26. Roh, S., Thai, V.V., & Wong, Y.D. (2016). Towards sustainable ASEAN port development: Challenges and opportunities for Vietnamese ports. *Asian Journal of Shipping and Logistics*. 32 (2). 107–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2016.05.004>.
27. Hossain, T., Adams, M., & Walker, T.R. (2019). Sustainability initiatives in Canadian ports. *Marine Policy*. 106. 103519.
28. A.P. Moller-Maersk. (2024, July 20). A.P. Moller – Maersk and IBM to discontinue TradeLens, a blockchain-enabled global trade platform [Press release]. Maersk. URL: <https://www.maersk.com/news/articles/2022/11/29/maersk-and-ibm-to-discontinue-tradelens>
29. ZIM. (2023). ZIM ESG report 2023 (p. 17). URL: <https://www.zim.com/assets/pjgntgj5/zim-esg-report-2023.pdf#page=17>
30. DB Schenker. (n.d.). DB code of conduct for business partners. URL: <https://www.dbschenker.com/resource/blob/819872/48b909233624b57ce8c056c87839f75c/compliance-eng-db-code-of-conduct-for-business-partners-valid-from-2019-05-01-data.pdf>
31. Kuehne + Nagel International AG. (n.d.). Kuehne+Nagel supplier code of conduct 2024. URL: <https://home.kuehne-nagel.com/documents/20124/72221/kuehne-nagel-supplier-code-of-conduct-2024.pdf/cfa86ffa-ec3c-9152-0214-96223acaefb7?t=1733734018722>
32. Hupac Intermodal. (n.d.). Hupac code of conduct. URL: [https://www.hupac.com/Code-of-Conduct-6930be00?MasterId=g1\\_8256](https://www.hupac.com/Code-of-Conduct-6930be00?MasterId=g1_8256)
33. United Nations Global Compact. (n.d.). Our participants. URL: <https://unglobalcompact.org/what-is-gc/participants/search?button=&page=1&search%5Bkeywords%5D=PSA>
34. SLOCAT Partnership on Sustainable, Low Carbon Transport. (2020, March 17). 2030 agenda: SDGs. SLOCAT. URL: <https://slocat.net/our-work-2022/2030-agenda-sdgs/>.
35. Rail Cargo Group. (n.d.). Gender diversity in the ÖBB Rail Cargo Group: an update. Rail Cargo Group Blog. URL: <https://blog.railcargo.com/en/artikel/she-is-railcore-part-2>
36. Hellmann Worldwide Logistics. (n.d.). Social. URL: <https://www.hellmann.com/en/report-2024/social>.
37. A.P. Moller-Maersk. (n.d.). LGBTQIA+. URL: <https://www.maersk.com/careers/diversity-equity-and-inclusion/lgbtqi-plus>
38. Chronicle.lu. (2025, May 28). CFL signs women in rail agreement. *Chronicle.lu*. URL: <https://chronicle.lu/category/rail/38275-cfl-signs-women-in-rail-agreement>

39. GROUPE CFL. (n.d.). Politique égalité femmes-hommes. URL: [https://groupe.cfl.lu/Cfl.Groupe/media/Publications/CSR/Politique\\_20\\_C3\\_A9galite\\_20femmes-hommes.pdf](https://groupe.cfl.lu/Cfl.Groupe/media/Publications/CSR/Politique_20_C3_A9galite_20femmes-hommes.pdf)
40. CEVA Logistics; ENGIE; SANEF. (n.d.). CEVA Logistics, ENGIE and SANEF launch an alliance to decarbonize road freight transport. URL: <https://www.cevalogistics.com/en/news-and-media/Newsroom/ceva-logistics-engie-and-sanef-launch-an-alliance-to-decarbonize-road-freight-transport>
41. Hapag-Lloyd AG. (n.d.). Society – Hapag-Lloyd. URL: <https://www.hapag-lloyd.com/en/company/responsibility/sustainability/engagement.html>
42. DB Schenker. (2022, May 13). DB Schenker moves for Ocean Conservancy. URL: <https://www.dbschenker.com/global/db-schenker-moves-for-ocean-conservancy-779984>
43. Smart Freight Centre. (n.d.). Smart Freight Centre: Clean Cargo program. URL: <https://www.smartfreightcentre.org/en/our-programs/maritime/clean-cargo-1/>
44. Indicators Report. (n.d.). 17.6 Enhance North–South, South–South and triangular cooperation on science, technology and innovation. URL: <https://indicators.report/targets/17-6/>
45. Maritime Anti-Corruption Network. (2025, May 19). MACN members. URL: <https://macn.dk/macn-members/>

Дата першого надходження статті до видання: 28.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.11.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті: 26.12.2025

## ЗАХИСТ КОЛЕКТОРА ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОВОЗА ВІД ПОШКОДЖЕННЯ ДУГОВИМ РОЗРЯДОМ

В.Ю. Торгашов<sup>1</sup>, М.О. Баб'як<sup>2</sup>

<sup>1</sup>асистент кафедри залізничного транспорту,  
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна,  
ORCID ID: 0009-0003-9369-2121

<sup>2</sup>к.т.н., доцент кафедри залізничного транспорту,  
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна,  
ORCID ID: 0000-0001-5125-9133

### Анотація

До залізничного транспорту висуваються високі вимоги щодо його безпеки та надійності. Вихід з ладу електровоза може ставити під загрозу безпеку руху, а також призвести до матеріальних та економічних витрат. Одними з найвразливіших елементів електричного рухомого складу залізниць є тягові електричні двигуни, які на багатьох електровозах мають значний термін експлуатації. Внаслідок значного вичерпання ресурсу та через важкі умови експлуатації збільшується імовірність виникнення несправностей як у механічній, так і в електричній частинах двигуна. Особливу увагу варто приділити несправностям, які пов'язані із щіточно-колекторним вузлом тягового електричного двигуна. Розглянувши причини виходу з ладу колекторних електричних двигунів різних серій електровозів, видно, що значний відсоток виходів з ладу пов'язаний із пошкодженням саме щіточно-колекторного вузла. Основною причиною такої закономірності є фізична взаємодія двох контактів, які рухаються один стосовно одного, що породжує можливість виникнення електричної дуги між ними. У цій роботі розглянуто причини виникнення дугового розряду в щіточно-колекторному вузлі тягового електричного двигуна електровоза, що може призводити до серйозних пошкоджень та відмов у роботі. Проаналізовано наявні методи діагностики тягових двигунів, визначено їхні переваги та недоліки. Розроблено методику виявлення утворення дуги у щіточно-колекторному вузлі на основі вимірювання інтенсивності ультрафіолетового випромінювання. Розроблено систему захисту двигуна, яка базується на програмованому логічному контролері. Обґрунтовано доцільність та ефективність впровадження такої системи на електровозах для підвищення надійності тягових електродвигунів та зниження експлуатаційних витрат. Оскільки на локомотивах, що експлуатуються в Україні, колекторні електричні машини застосовуються не лише для утворення тягового зусилля, а й для генерації струму збудження, напруги власних потреб та для роботи інших агрегатів, логічним розвитком описаної у роботі теми може стати удосконалення системи для виконання захисту допоміжних машин електровозів. У перспективі це дозволило б ще більше збільшити надійність та продуктивність роботи електрорухомого складу залізниць.

**Ключові слова:** тяговий електричний двигун, щіточно-колекторний вузол, електрична дуга, діагностика.

**PROTECTION OF ELECTRIC LOCOMOTIVE TRACTION MOTOR  
COLLECTOR AGAINST DAMAGE BY ARC DISCHARGE**

**V.Yu. Torhashov<sup>1</sup>, M.O. Babyak<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Assistant at the Department of Railway Transport,  
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,  
ORCID ID: 0009-0003-9369-2121

<sup>2</sup>Ph.D., Associate Professor at the Department of Railway Transport,  
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0001-5125-9133

**Summary**

*High requirements are imposed on railway transport in terms of its safety and reliability. The failure of an electric locomotive can jeopardize traffic safety, as well as lead to material and economic costs. One of the most vulnerable elements of the electric rolling stock of railways are traction electric motors, which on many electric locomotives have a significant service life. Due to significant depletion of the resource and due to difficult operating conditions, the likelihood of malfunctions in both the mechanical and electrical parts of the engine increases. Particular attention should be paid to malfunctions associated with the brush-commutator assembly of the traction electric motor. Having considered the causes of the failure of collector electric motors of various series of electric locomotives, it is clear that a significant percentage of failures is associated with damage to the brush-commutator assembly. The main reason for this pattern is the physical interaction of two contacts that move relative to each other, which creates the possibility of an electric arc between them. This paper examines the causes of arc discharge in the brush-commutator assembly of the traction electric motor of an electric locomotive, which can lead to serious damage and failures. Existing methods of diagnosing traction motors are analyzed, their advantages and disadvantages are determined. A method for detecting arc formation in the brush-commutator assembly based on measuring the intensity of ultraviolet radiation is developed. An engine protection system based on a programmable logic controller is developed. The feasibility and effectiveness of implementing such a system on electric locomotives to increase the reliability of traction electric motors and reduce operating costs is substantiated. Since on locomotives operated in Ukraine, DC electric machines are used not only to generate traction force, but also to generate excitation current, voltage for their own needs and for the operation of other units, a logical development of the topic described in the paper can be the improvement of the system for protecting auxiliary machines of electric locomotives. In the future, this would further increase the reliability and productivity of electric railway rolling stock.*

**Key words:** traction electric motor, brush-commutator assembly, electric arc, diagnostics.

**Актуальність дослідження.** Залізничний транспорт відіграє важливу роль у забезпеченні вантажних і пасажирських перевезень, зберігаючи стратегічне значення для економіки України.

Надійність і ефективність роботи локомотивного парку є важливою умовою стабільного функціонування залізничної галузі.

Високі вимоги до безпеки руху та необхідність покращення економічних показників роботи залізниці породжують необхідність збереження та підвищення надійності роботи всього обладнання тягового рухомого складу. Особливу увагу приділяють тяговим електричним двигунам (ТЕД), які забезпечують безпосередню реалізацію тягового зусилля електровоза. Надійність їх роботи суттєво впливає на загальну працездатність локомотива, а відмова або пошкодження таких вузлів може призвести до аварійних ситуацій та простоїв.

У зв'язку з цим розробка і впровадження методики виявлення та запобігання появи раптових несправностей тягових електричних двигунів є актуальною і практично значущою.

**Постановка проблеми.** Однією з вразливих частин тягового електричного двигуна, який застосовується на електровозах, є його щіточно-колекторний вузол. Він призначений для комутації обмоток якоря, які обертаються, у визначений момент часу, який залежить від конструкції тягового двигуна, та передачі електричного струму від нерухомих контактних елементів, що називаються щітками, які кріпляться в щіткотримачі до нерухомого остова.

Конструкцію колектора двигуна постійного струму показано на рисунку 1.

Основними елементами щіточно-колекторного вузла є набір мідних пластин, до півників яких підключається обмотка якоря. Поверхні пластин торкаються графітові щітки, які утримуються на місці корпусом щіткотримача та притискаються пружиною із необхідною силою для забезпечення номінального натиску щіток, що є важливим для надійної роботи вузла.

Схематичне зображення конструкції щіткотримача електродвигуна постійного струму та траверси, на якій він кріпиться, показано на рисунку 2.

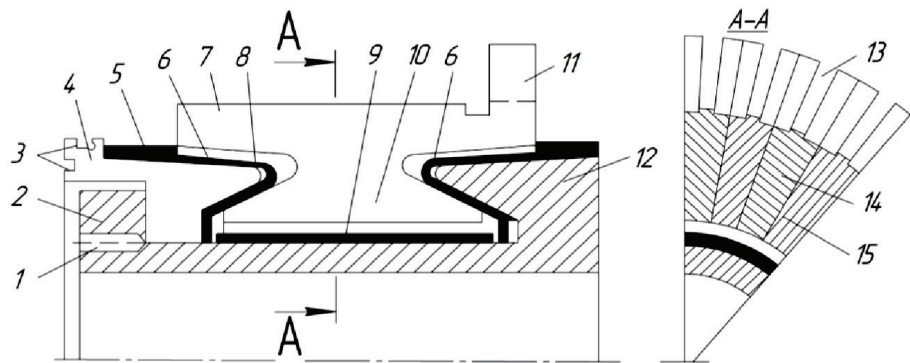


Рис. 1. Конструкція колектора на сталевій втулці [1]:

1 – стопорний гвинт; 2 – гайка; 3 – кільцеві канавки для балансувальних вантажів; 4 – конус натискання; 5 – бандаж; 6 – ізоляційні міканітові манжети; 7 – робоча частина колекторної пластини; 8 – зазор; 9 – ізоляційний циліндр; 10 – ластівчин хвіст; 11 – півник; 12 – корпус колектора (сталеві втулка); 13 – шліц у півнику; 14 – комплект колекторних пластин; 15 – колекторна міканітова прокладка

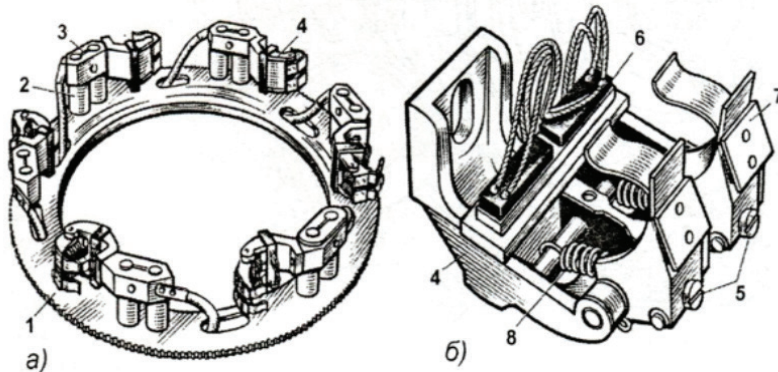


Рис. 2. Траверса (а) і щіткотримач (б) тягового електродвигуна постійного струму [2]: 1 – траверса; 2 – палець; 3 – кронштейн; 4 – щіткотримач; 5 – регулювальні гвинти; 6 – щітка; 7 – поворотний кронштейн; 8 – пружина

На ТЕД для покращення робочих параметрів застосовуються розрізні щітки, які запобігають заклинюванню щітки, а також мають меншу імовірність відриву від поверхні колекторних пластин, що важливо для запобігання утворення дуги.

Кількість пластин, щіток, їх розміри та інші параметри щіточно-колекторного вузла можуть відрізнятися залежно від типу двигуна.

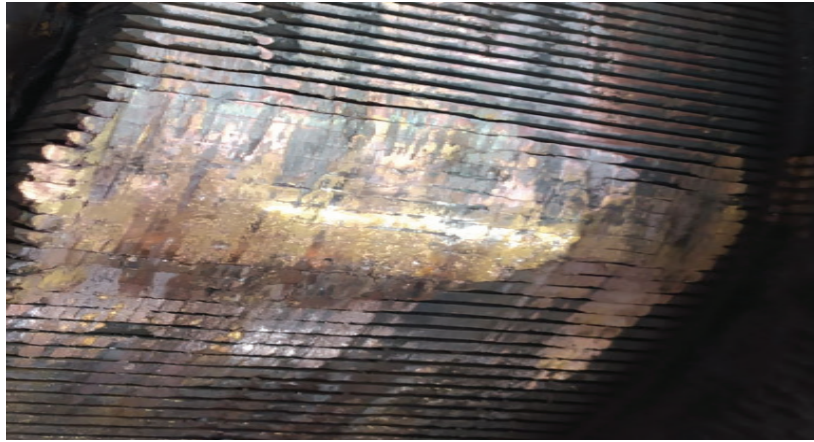
Проте спільним недоліком усіх колекторних електродвигунів є те, що під час роботи на колекторі може виникати іскріння, яке за певних умов може перерости у круговий вогонь.

Є декілька причин появи іскріння щіток, серед основних можна виділити неправильний натиск щіток на колектор, надмірне зношення щіток, закусування щітки у щіткотримачі, нерівності на поверхні колектора.

Оскільки електрична дуга має значну температуру, вона може викликати перегрівання зони контакту, що може призвести до пошкодження колекторних пластин або корпусу колектора, з можливим утворенням наплавів, задирів та зтягування робочої поверхні колекторних пластин та інших пошкоджень, що показано на рисунках 3, 4.



Рис. 3. Пошкодження колектора, що викликані утворенням електричної дуги та натисканням щіток [3]



*Рис. 4. Зварювання колекторних пластин між собою під дією електричної дуги та натисканням щіток [3]*

Пошкоджений колектор зазвичай викликає ще більше іскріння, що значно погіршує його стан. Тривалий процес іскріння може призвести до кругового вогня та до зварювання колекторних пластин між собою, що показано на рисунку 4.

У разі таких пошкоджень досить часто виникає необхідність викочення колісно-моторного блоку з-під електровоза та ремонту тягового двигуна. Проточування колекторних пластин стає неможливим, що вимагає капітального ремонту або заміни якоря.

Раннє виявлення появи дугового розряду на щіточно-колекторному вузлі дозволило б зменшити витрати на ремонт тягових електричних двигунів, а також зменшити ймовірність їх виходу з ладу під час виконання поїзної роботи.

На залізницях України використовуються різні електровози, у яких застосовується застаріла елементна база або її немає зовсім. На більшості серій електровозів впроваджено лише захист від короткого замикання у двигунах, боксування і перевантаження.

Тому в цій роботі пропонується вирішити проблему пошкодження ТЕД електрорухомого складу під дією електричної дуги.

**Теоретичний аналіз дослідження.** У більшості відомих досліджень пропонується захист ТЕД на основі прямого вимірювання параметрів електричного кола, в яке включено тяговий електричний двигун. Виникнення іскріння викликає специфічні завади в колі, які можна виявити шляхом прямого виміру параметрів електричної схеми електровоза, а саме струму та напруги на колекторах двигунів [4; 5; 6; 7].

За допомогою математичних перетворень отриманих значень система повинна визначити наявність іскріння.

Недоліком такого методу є застосування прямого вимірювання параметрів із високою частотою вибірки, що на електровозі практично неможливо через значну кількість електромагнітних завод різних частот. Однією з основних проблем є величина напруги, що подається на колектор ТЕД.

Також у цій системі виникають помилкові спрацювання, оскільки в колі ТЕД використовуються електропневматичні контактори, на яких виникають значні дугові розряди при комутаціях.

У роботі [8] подавалися пропозиції вимірювання рівня електромагнітних завад від двигуна через індуктивні датчики на його корпусі. Під час виникнення дугового розряду утворюються специфічні електромагнітні завади, які індукують струм у котушці датчика.

Схематично розміщення датчика показано на рисунку 5.

Отримані сигнали обробляються за допомогою математичних перетворень та дозволяють зробити висновок про наявність дугового розряду та його інтенсивність.

Такий метод не вимагає втручання в коло. Проте в реальних умовах роботи електрорухомого складу залізниці така система працюватиме нестабільно через велику кількість електромагнітних завад, які генеруються усіма складниками електровоза, а також вимагає високоточного і дорогого обладнання та його налаштування під конкретний тип двигуна.

Тому впровадження такого методу є проблематичним і недоцільним в умовах залізничного транспорту.

Проаналізувавши наявні методи виявлення електричної дуги на колекторі, можна зробити висновок про недосконалість різних систем для використання їх на електрорухомому складі, що вимагає узагальнення та удосконалення відомих методів.

**Мета роботи.** У цьому дослідженні проводиться аналіз роботи розробленої авторами інноваційної системи моніторингу й захисту тягових електродвигунів електрорухомого складу від виникнення електричної дуги, яка може призвести до негативних наслідків.

**Завдання дослідження:**

1. Аналіз фізичного механізму виникнення та розвитку електричної дуги у щіточно-колекторному вузлі тягового електродвигуна та визначення параметрів дугового розряду, за якими можливе його виявлення.

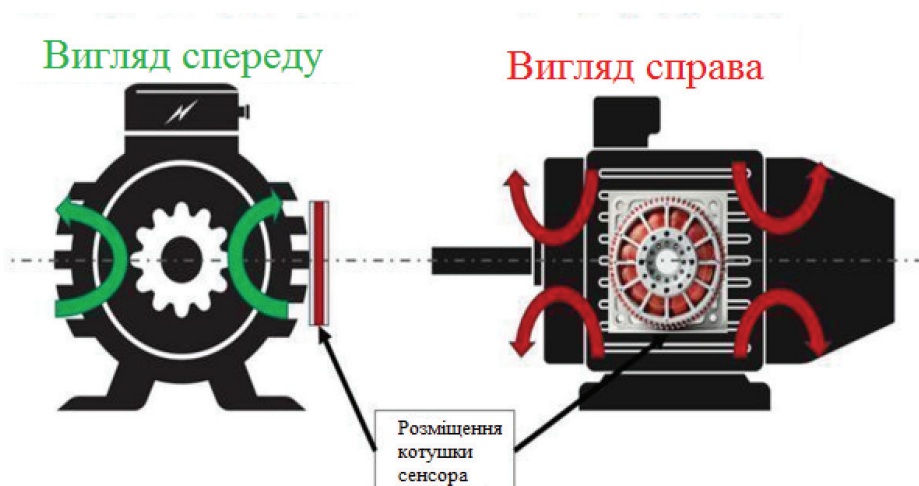


Рис. 5. Схематичне зображення розміщення датчика електромагнітних завад на корпусі двигуна [8]

2. Розробка архітектури інноваційної системи моніторингу, що поєднує сенсорні елементи та методи обробки сигналів, для виявлення дугового розряду.

**Основний матеріал дослідження.** Прямі вимірювання динаміки струму та напруги у колі тягових електричних двигунів електровозів є вкрай ускладненими через високу напругу живлення (1500 В). Тому доцільно вибрати не струм та напругу, а інший параметр, який дозволить відслідковувати електричну дугу, що виникає на колекторі.

Розглянувши характеристики електричної дуги, відомо, що вона породжує не лише електромагнітні завади, а й певну кількість світлового випромінювання у видимому діапазоні.

Проаналізувавши результати дослідження [9], що наведені на рисунку 6, спостерігається схожість спектрів дуги, з яких випливає, що стовп дугового розряду випромінює електромагнітні хвилі довжиною, близькою до 300 нм.

Тобто можна сказати, що у спектрі електричної дуги переважає ультрафіолетове випромінювання, довжина хвилі якого практично не залежить від частоти модуляції струму в електричному розряді.

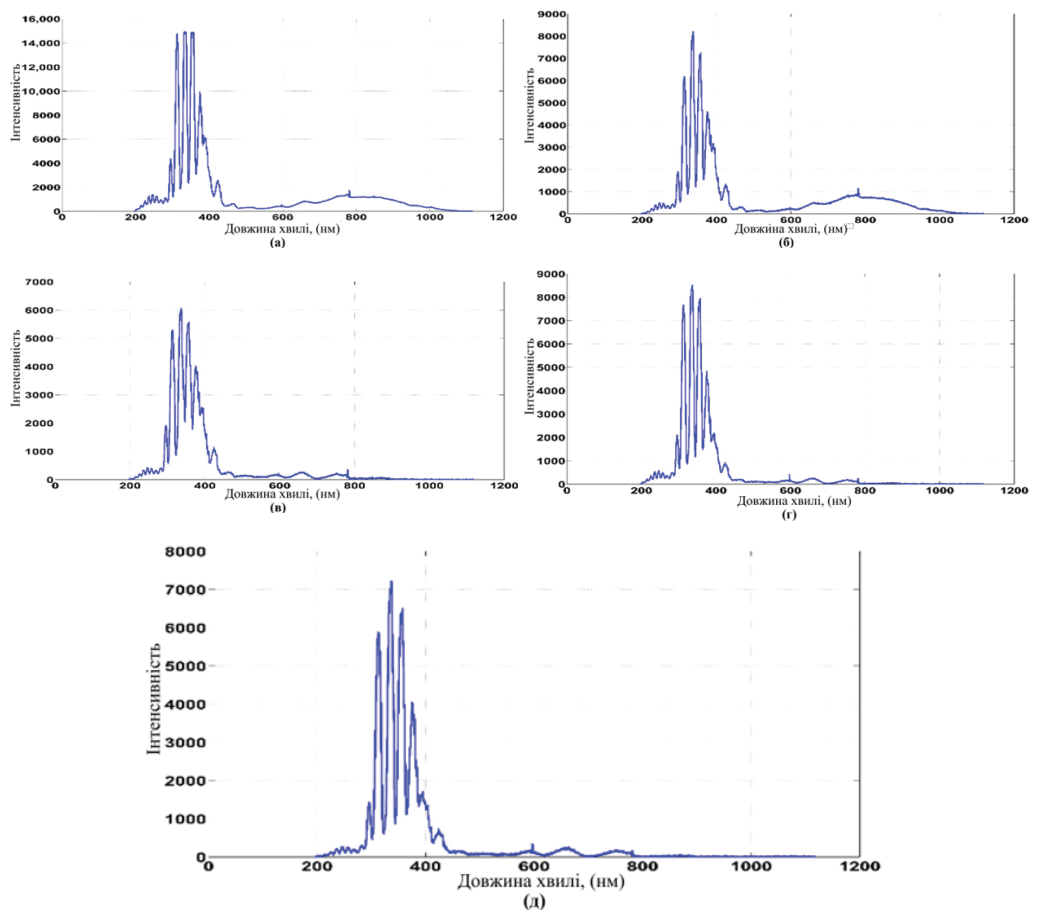


Рис. 6. Залежності інтенсивності світлового випромінювання електричної дуги від довжини електромагнітної хвилі за різних частот модуляції електричного струму: а) 13,5 кГц; б) 20,0 кГц; в) 80,0 кГц; г) 100,0 кГц; д) 150,0 кГц [9]

За результатами цього аналізу для виявлення дугового розряду між щіткою і колектором нами пропонується використовувати датчик ультрафіолетового випромінювання.

Основна перевага такої пропозиції полягає у новій технології виявлення дуги в тягових електричних двигунах електрорухомого складу. При цьому використовується доволі проста конструкція вимірювального комплексу без застосування дорогих і складних високоточних пристроїв.

Однак за такого підходу слід припустити мінімальну ймовірність хибних спрацювань від сонячного випромінювання.

Але тягові електричні двигуни виготовляються у щільно закритому корпусі та розташовані під кузовом електровоза.

Додатково більша частина корпусу двигуна закрита рамою візка. Тому потрапляння сонячного ультрафіолету всередину тягового електричного двигуна мало ймовірне.

Розглянемо ще одне припущення, за якого мізерна кількість сонячного ультрафіолету може потрапити через вентиляційну решітку. Навіть у разі такого мало ймовірного випадку випромінюванню доведеться відбитися декілька разів від масивного корпусу, що зменшить його інтенсивність до мінімуму.

Ще одним фактором, який зменшує ймовірність потрапляння сонячного ультрафіолету на датчик, є те, що на більшості тягових електродвигунів повітря для охолодження подається зі сторони колектора, і вихлопний кожух знаходиться з іншої сторони якоря.

За такої конструкції шлях для можливого ультрафіолетового випромінювання додатково перекривається якорем.

Як детектор використовується фотодіод зі світлофільтром, який працює в ультрафіолетовому діапазоні. У разі потрапляння у вікно детектора ультрафіолетового випромінювання через фотодіод починає протікати струм, що пропорційний інтенсивності випромінювання.

Для цього дослідження нами вибрано фотодіод GFUV-T10GD-L, що має лінійну залежність струму, який протікає через нього, від потужності випромінювання, яке вимірюється в мВт/см<sup>2</sup>. Струмова характеристика фотодіода GFUV-T10GD-L наведена на рисунку 7.

Фотодіод встановлюється всередині корпусу тягового електродвигуна разом із платою підсилювача та за допомогою дротового підключення передає сигнал до керуючого елементу системи, що розташовують у кузові електровоза.

Як керуючий елемент використовується програмований логічний контролер (ПЛК), який отримує та аналізує інформацію з датчиків. На основі результатів аналізу ПЛК робить висновок про виявлення несправності щіточно-колекторного вузла.

Згідно з характеристикою, що зображена на рисунку 5, фотодіод видає сигнал величиною від 0 до 1,5 мкА. Такий сигнал неможливо передати на значну відстань, особливо в умовах електровоза, який генерує значну кількість електромагнітних завад.

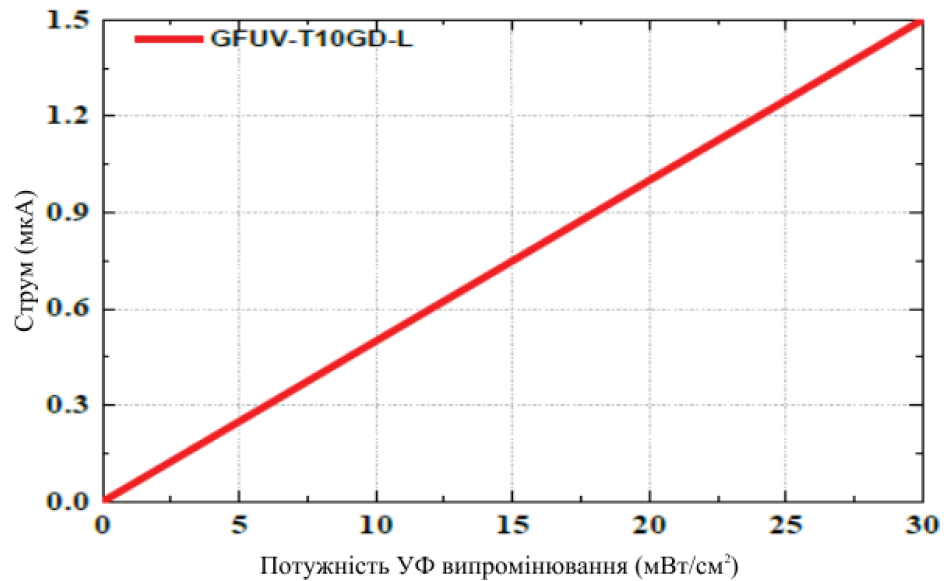


Рис. 7. Залежність струму від інтенсивності випромінювання для фотодіода GFUV-T10GD-L у разі опромінення його лампою з довжиною хвилі 222 нм [10]

Для вирішення цієї проблеми на фотодіод встановлюється плата підсилювача, яка перетворює слабкий сигнал фотодіода на промисловий стандарт 4...20 мА.

Перетворений сигнал подається на аналоговий вхід ПЛК.

Передача сигналу струмом, а не напругою збільшує його завадозахищеність, що є особливо важливим у реальних умовах експлуатації електричного транспорту залізниць.

Аналізуючи сигнали, ПЛК отримує інформацію про наявність іскріння на колекторі тягового електродвигуна та у разі перевищення допустимих значень сигналізує машиністу про несправність.

У разі ігнорування машиністом сигналу від системи виконується розбирання силового кола з метою захисту двигуна від подальшого пошкодження.

У більшості електровозів, що експлуатуються в Україні, на кожній секції застосовується осьова формула 2о-2о, тобто чотири моторних осі розділені на два візки [4; 5; 6; 7].

У такій конфігурації кількість ТЕД на одній секції становить чотири, а отже, і входів ПЛК для реалізації захисту також необхідно чотири.

Серед популярних рішень таким параметрам задовольняє ПЛК від SIMENS, а саме S7-1200 з модулем розширення SM1231. Проте таке рішення є дорогим і нецільним через його можливості, які не будуть застосовуватися повною мірою, та значну вартість.

Як ПЛК нами пропонується вибрати контролер виробництва компанії Unitrionics. Згідно з каталогом пристроїв [11] є два можливих варіанти, а саме окремий модуль вводу/виводу, який працює через Ethernet, та ПЛК серії VISION. Оскільки для першого варіанту необхідний додатковий ПЛК, що є нецільним, нами вибрано VISION V130-J-TR6.

Для вибору порогового значення спрацювання системи проводиться вибірка замірів інтенсивності випромінювання у справних двигунах та ТЕД з різними пошкодженнями, які викликають іскріння на колекторі. З кожного заміру вибирається максимальне і мінімальне значення інтенсивності вхідного сигналу. Отримані значення дозволяють отримати діапазон інтенсивності випромінювання справного та несправного тягового двигуна. Між діапазонами інтенсивності випромінювання у справних та несправних ТЕД логічно очікувати проміжок, в який не потрапляє значення інтенсивності випромінювання ні справних, ні несправних двигунів, посередині якого вибирається порогове значення спрацювання розробленої системи захисту. Визначення конкретного значення порогу спрацювання системи потребує проведення додаткових досліджень для отримання релевантної вибірки значень інтенсивності випромінювання за різних типів пошкоджень.

**Висновки.** Впровадження описаної вище системи захисту тягових електричних двигунів за розробленою нами методикою виявлення утворення дуги у щіточно-колекторному вузлі на основі вимірювання інтенсивності ультрафіолетового випромінювання всередині корпусу двигуна дозволить вчасно попередити утворення дугового розряду на колекторі та запобігти значним пошкодженням внаслідок перегріву контактних поверхонь колекторних пластин.

Своєю чергою це дозволяє покращити надійність роботи тягових електричних двигунів та електровоза загалом, що повинно призвести до зменшення ймовірності простою рухомого складу.

Розроблена нами система захисту тягових електричних двигунів дозволяє зменшити витрати на ремонт як тягового двигунів, так і електровозів загалом, що дозволяє її впровадження вважати актуальним та виправданим.

Подальшим напрямом розвитку описаної в роботі системи може стати виконання захисту не лише тягових електродвигунів, а й допоміжних електричних машин, в яких також застосовуються колектори.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Проектування електричних машин : навчальний посібник / Д.В. Ципленков та ін. Дніпро : Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2020. 408 с.
2. Тягові електродвигуни вантажних електровозів. URL: <https://raillook.com/materialy/transport/jeleznodorojniy/tyagovi-podvijnoi-sostav/tyagovi-elektrodviguni-vantazhnih-elektrovoziv-docx> (дата звернення: 11.06.2025).
3. Щіточно-колекторний вузол тягового електродвигуна. Особистий архів автора, 2025.
4. Martínez Iglesias M.E., Antonino-Daviu J.A., Dunai L., Conejero J.A., Fernández de Córdoba P. Higher-Order Spectral Analysis and Artificial Intelligence for Diagnosing Faults in Electrical Machines: An Overview. *Mathematics*. 2024. Т. 12. № 24. Р. 4032. DOI: 10.3390/math12244032.
5. Babyak M., Neduzha L. Transportation Optimization of Homogeneous Freight in the Transport Systems. *Proceedings of the 26th International*

- Conference “Transport Means”. Kaunas, Lithuania, 5–7 October 2022. P. 755–760. DOI: 10.5755/e01.2351-7034.2022.P2.
6. Babyak M., Keršys R., Neduzha L. Improving the dependability evaluation technique of a transport vehicle. *Transport Means : Proceedings of International Conference*. 2020. P. 646–651.
  7. Babyak M., Horobets V., Sychenko V., Horobets Y. Comparative tests of contact elements at current collectors in order to comprehensively assess their operational performance. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. T. 6, № 12 (96). P. 13–21. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.151751.
  8. Salas-Robles J.E., Biot-Monterde V., Antonino-Daviu J.A. Current and Stray Flux Combined Analysis for Sparking Detection in DC Motors / Generators Using Shannon Entropy. *Entropy*. 2024. T. 26. № 9. P. 744. DOI: 10.3390/e26090744.
  9. Nagi L., Koziol M., Zygarlicki J. Optical Radiation from an Electric Arc at Different Frequencies. *Energies*. 2020. T. 13. № 7. P. 1676. DOI: 10.3390/en13071676.
  10. GFUV-T10GD-LUV photodiode datasheet. URL: <https://www.oec-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/04/OEC-GFUV-T10GD-L.pdf> (дата звернення: 23.06.2025)
  11. Unitronics. All products catalog – Global. URL: [https://www.unitronicsplc.com/Website/Technica\\_Support/Product\\_catalogs/All\\_products\\_catalog\\_Global.pdf](https://www.unitronicsplc.com/Website/Technica_Support/Product_catalogs/All_products_catalog_Global.pdf) (дата звернення: 23.06.2025).

## REFERENCES

1. Tsiplenkov, D.V., Ivanov, O.B., Bobrov, O.V., Kuznetsov, V.V., Artemchuk, V.V., & Bab’iak, M.O. (2020). Design of electric machines: Textbook [Electronic resource]. Dnipro : National Technical University “Dnipro Polytechnic”, 408 p.
2. Traction electric motors of freight locomotives (2018, July 18). [Electronic resource]. URL: <https://raillook.com/materialy/transport/jeznodorojniy/tyagoviy-podvijnoi-sostav/tyagovi-elektrodiviguni-vantazhnih-elektrovoziv-docx>
3. Author’s own photo. (2025). Brush-commutator assembly of a traction electric motor [Photograph]. Personal archive.
4. Martínez Iglesias, M.E., Antonino-Daviu, J.A., Dunai, L., Conejero, J.A., & Fernández de Córdoba, P. (2024). Higher-order spectral analysis and artificial intelligence for diagnosing faults in electrical machines: An overview. *Mathematics*. 12 (24), 4032. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12244032>.
5. Babyak, M., & Neduzha, L. (2022). Transportation optimization of homogeneous freight in the transport systems. In Proceedings of the 26th International Conference “Transport Means” (pp. 755–760). Kaunas, Lithuania, October 5–7. DOI: <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2022.P2>.
6. Babyak, M., Keršys, R., & Neduzha, L. (2020). Improving the dependability evaluation technique of a transport vehicle. *Transport Means : Proceedings of the International Conference*. 646–651.

7. Babyak, M., Horobets, V., Sychenko, V., & Horobets, Y. (2018). Comparative tests of contact elements at current collectors in order to comprehensively assess their operational performance. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 6 (12 (96)). 13–21. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.151751>.
8. Salas-Robles, J.E., Biot-Monterde, V., & Antonino-Daviu, J.A. (2024). Current and stray flux combined analysis for sparking detection in DC motors/generators using Shannon entropy. *Entropy*. 26 (9). 744. DOI: <https://doi.org/10.3390/e26090744>.
9. Nagi, Ł., Koziół, M., & Zygarlicki, J. (2020). Optical radiation from an electric arc at different frequencies. *Energies*. 13 (7). 1676. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13071676>.
10. GFUV-T10GD-L UV photodiode datasheet. (n.d.). OEC GmbH. URL: <https://www.oec-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/04/OEC-GFUV-T10GD-L.pdf>
11. Unitronics. (n.d.). All products catalog – Global. URL: [https://www.unitronicsplc.com/Website/Technical\\_Support/Product\\_catalogs/All\\_products\\_catalog\\_Global.pdf](https://www.unitronicsplc.com/Website/Technical_Support/Product_catalogs/All_products_catalog_Global.pdf)

Дата першого надходження статті до видання: 27.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 26.11.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті: 26.12.2025

## НОТАТКИ

Наукове видання

## РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

Випуск 4(27), 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. 13,13.  
Замов. № 0326/231. Наклад 200 прим.

---

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

Scientific publication

# TRANSPORT DEVELOPMENT

**Scientific journal**

**Issue 4(27), 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 13,13.  
Order No 0326/231. 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](mailto:mailbox@helvetica.ua)  
Certificate of publishing entity  
ДК № 7623 as of 22.06.2022