

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

ВИПУСК 2(25), 2025

Заснований у жовтні 2016 року



Видавничий дім
«Гельветика»
2025

ОДЕСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ
НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 2(25)
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

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

Засновник:

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

Редакційна колегія:

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

Члени редакційної колегії:

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

Духовник Йозе, 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: Гришин А.В., Дрожжин О.Л., Костюченко В.І., Мальчевський В.П.,
Палагута В.М., Пітерська В.М., Сагайдак О.І.

Рекомендовано до друку Вченою радою
Одеського національного морського університету
(протокол № 13 від 25.06.2025 р.)

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

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

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

ODESSA
NATIONAL MARITIME UNIVERSITY

TRANSPORT DEVELOPMENT

Scientific journal

ISSUE 2(25), 2025

Founded in October 2016



Publishing House
"Helvetica"
2025

ODESSA
NATIONAL MARITIME UNIVERSITY
TRANSPORT DEVELOPMENT
SCIENTIFIC JOURNAL

№ 2(25)
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

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

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

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

Editorial Board Members:

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

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

Reviewers: Hryshyn A.V., Drozhzhyn O.L., Kostiuchenko V.I., Malchevskiy V.P.,
Palahuta V.M., Piterska V.M., Sahaidak O.I.

Recommended for printing by the Academic Council of Odessa National Maritime University
(Minutes No 13 dated June 25, 2025)

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

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

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

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

З М І С Т

МЕНЕДЖМЕНТ

Т.А. Ковтун, О.В. Меркт, І.О. Фіногорова Маркетинговий підхід до управління наданням фахових освітніх послуг.....	7
І.О. Лапкіна, І.Є. Сєногонов Вплив правил ІМО 2023 року стосовно системи торгівлі викидами Європейського Союзу (EU ETS) на учасників ринку морських суховантажних перевезень.....	24

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

А.О. Ловська, М.В. Павлюченков, А.О. Мурад'ян, О.В. Демидюков Дослідження міцності каркаса контейнера удосконаленої конструкції при вантажно-розвантажувальних операціях.....	34
О.В. Fomin, O.V. Burlutskyi, T.V. Stoliarenko, S.M. Leonov Prospects for creating digital twins of freight cars.....	45

МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

М.П. Булгаков, О.М. Мельник, І.О. Пуляєв Інноваційні технології та нормативна база для оптимізації енергоспоживання на морському транспорті.....	56
В.В. Мадей, Ю.В. Заблоцький, А.С. Сагін Оцінка ефективності використання палива біологічного походження в суднових дизелях.....	71
С.В. Сагін, О.А. Куропятник Використання системи рециркуляції випускних газів високого тиску для забезпечення екологічних показників суднових дизелів.....	86

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

М.С. Вільшанюк Підвищення оперативності морського агентування через використання мережевого планування.....	99
О.А. Воронков, І.Л. Роговський Модель узгодження транспортних потоків перевезення збіжжя автотранспортними засобами з поля до тимчасового пункту зберігання.....	108
О.В. Кириллова, В.Ю. Кириллова Smart-кластери в портовій системі України: концептуальні засади та прикладні орієнтири.....	122
О.М. Korobkova, L.A. Pavlovska, N.G. Shpak Infrastructural problems of import delivery of petroleum products in war conditions....	140
О.О. Sapronov, V.L. Demchenko, D.O. Danylenko, A.V. Sapronova Improvement of operational and repair characteristics of cargo tank surfaces of bulk tanker-chemical cargo vehicles by implementing hybrid epoxy-polyurethane coatings.....	151

C O N T E N T S

MANAGEMENT

- T.A. Kovtun, O.V. Merkt, I.O. Finohenova**
Marketing approach to managing the provision of professional educational services.....7
- I.O. Lapkina, I.Ye. Syenogonov**
European Union Emissions Trading System under IMO
rules 2023 and its effect on dry bulk maritime transport market participants.....24

INDUSTRIAL MECHANICAL ENGINEERING

- A.O. Lovska, M.V. Pavliuchenkov, A.O. Muradian, O.V. Demydiakov**
Research on the strength of the container frame of an improved design during
loading and unloading operations.....34
- O.V. Fomin, O.V. Burlutskyi, T.V. Stoliarenko, S.M. Leonov**
Prospects for creating digital twins of freight cars..... 45

SEA AND INLAND WATER TRANSPORT

- M.P. Bulgakov, O.M. Melnyk, I.O. Pulyaev**
Innovative technologies and regulatory framework for optimizing energy
consumption in maritime transport.....56
- V.V. Madey, Yu.V. Zablotskyi, A.S. Sagin**
Assessment of the efficiency of using fuels of biological origin in marine
diesel engines.....71
- S.V. Sagin, O.A. Kuropyatnyk**
Using a high-pressure exhaust gas recirculation system to ensure
the environmental performance of marine diesel engines.....86

TRANSPORT TECHNOLOGIES (BY TYPE)

- M.S. Vilshaniuk**
Enhancing the efficiency of maritime agency operations through the use
of network planning.....99
- O.A. Voronkov, I.L. Rogovskii**
Model of coordination of transport flows of grain transportation by vehicles
from field to temporary storage point.....108
- O.V. Kyrillova, V.Yu. Kyrillova**
Smart clusters in the port system of Ukraine: conceptual foundations
and practical orientations.....122
- O.M. Korobkova, L.A. Pavlovska, N.G. Shpak**
Infrastructural problems of import delivery of petroleum products in war conditions....140
- O.O. Sapronov, V.L. Demchenko, D.O. Danylenko, A.V. Sapronova**
Improvement of operational and repair characteristics of cargo tank surfaces of bulk
tanker-chemical cargo vehicles by implementing hybrid epoxy-polyurethane coatings.....151

МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 658:377

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2025.2-25.01>

МАРКЕТИНГОВИЙ ПІДХІД ДО УПРАВЛІННЯ НАДАННЯМ ФАХОВИХ ОСВІТНІХ ПОСЛУГ

Т.А. Ковтун¹, О.В. Меркет², І.О. Фіногенова³

¹д. т. н., професор, професор кафедри
«Управління логістичними системами і проектами»

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-5410-4783

²к.е.н., доцент, доцент кафедри «Управління логістичними системами і проектами»

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0009-0006-1903-590X

³магістр з проектного менеджменту, аспірант кафедри
«Управління логістичними системами і проектами»

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-9409-6135

Анотація

Вступ. Сучасні трансформаційні процеси в системі освіти України, спричинені глобалізацією освітнього простору та впровадженням ринкових механізмів, вимагають переосмислення підходів до організації освітнього процесу. Особливо актуальним стає дослідження сегменту фахової освіти, який безпосередньо пов'язаний із підготовкою кваліфікованих спеціалістів для ринку праці. У зв'язку з цим виникає потреба впровадження маркетингового підходу до управління освітньою діяльністю, що забезпечить відповідність пропозиції освітніх послуг вимогам споживачів та роботодавців. **Метою статті** є теоретичне обґрунтування та визначення особливостей маркетингового підходу до управління наданням фахових освітніх послуг. **Результати.** У статті визначено сутність ринку освітніх послуг як системи економічних відносин між суб'єктами освітнього процесу щодо купівлі-продажу освітніх послуг. Охарактеризовано основні властивості сучасного ринку освітніх послуг. Ідентифіковано та проаналізовано суб'єктів ринку фахових освітніх послуг. Досліджено взаємозв'язки ринку фахових освітніх послуг із суміжними ринками, зокрема ринком праці та споживчим ринком. **Висновки.** Ринок освітніх послуг являє собою складну систему, ефективне функціонування якої можливе за умов налагодження взаємодії між усіма суб'єктами. Ринок фахових освітніх послуг тісно взаємопов'язаний з ринком праці, що зумовлює необхідність узгодження структури підготовки фахівців із потребами роботодавців. Маркетинговий підхід до управління наданням фахових освітніх послуг є важливим інструментом підвищення конкурентоспроможності закладів освіти, що дозволяє своєчасно адаптувати освітні програми до вимог ринку та забезпечити високу якість підготовки фахівців.

Ключові слова: маркетинговий підхід, фахова освіта, освітні послуги, ринок освітніх послуг, суб'єкти ринку освіти, ринок праці.

MARKETING APPROACH TO MANAGING THE PROVISION
OF PROFESSIONAL EDUCATIONAL SERVICES

T.A. Kovtun¹, O.V. Merkt², I.O. Finohenova³

¹Doctor of science, Professor, Professor at the Department
«Logistic Systems and Projects Management»
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-5410-4783

²Doctor of philosophy, Associate Professor, Associate Professor at the Department
«Logistic Systems and Projects Management»
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0006-1903-590X

³Master of Logistics Management, Post Graduate Student of the Department
«Logistic Systems and Projects Management»
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-9409-6135

Summary

Introduction. Modern transformational processes in Ukraine's education system, caused by globalization and implementation of market mechanisms, require rethinking approaches to educational organization. Research on professional education, directly related to training qualified specialists for the labor market, becomes particularly relevant. There is a need to implement a marketing approach to educational management to ensure that educational services meet the requirements of consumers and employers. **The purpose of the article** is to theoretically substantiate and identify the features of the marketing approach to managing the provision of professional educational services. **Results.** The article defines the educational services market as a system of economic relations between subjects regarding the purchase and sale of educational services. The main characteristics of the modern educational services market, the subjects of the professional educational services market are identified and analyzed. The relationship between the professional educational services market and related markets, particularly the labor market, is examined. It has been established that imbalance between supply and demand in the labor market arises due to the insufficiently prompt response of the professional education system to dynamic economic changes. **Conclusions.** The educational services market is a complex system whose effective functioning requires established interaction between all subjects. The professional educational services market is closely interconnected with the labor market, necessitating harmonization of specialist training with employer needs. The marketing approach to managing professional educational services is an important tool for increasing the competitiveness of educational institutions, allowing timely adaptation of educational programs to market requirements and ensuring high-quality specialist training.

Key words: marketing approach, professional education, educational services, educational services market, subjects of education market, labor market.

Вступ. Сучасні трансформаційні процеси в системі освіти України, спричинені впровадженням ринкових механізмів в освітню діяльність, вимагають переосмислення підходів до організації освітнього процесу. Особливо актуальними ці питання стають для сегменту фахової освіти, який безпосередньо пов'язаний із підготовкою спеціалістів для ринку праці. Сучасність потребує підготовки висококваліфікованих фахівців, які не тільки володіють достатнім обсягом знань, але

й здатні ці знання застосовувати на практиці та постійно удосконалювати свої уміння і навички.

В умовах високої конкуренції на ринку освітніх послуг заклади фахової освіти мусять використовувати інноваційні методи управління освітньою діяльністю для забезпечення власної конкурентоспроможності. Одним із найефективніших підходів стає маркетинговий, що дозволяє вивчати та задовольняти потреби учасників ринку освітніх послуг, а також налагоджувати взаємодію між ринком фахової освіти та ринком праці.

Застосування маркетингового підходу до управління освітніми послугами набуває особливого значення в контексті необхідності подолання дисбалансу між попитом та пропозицією на ринку праці, що виникає через недостатньо оперативну реакцію системи фахової освіти на динамічні зміни в економіці та суспільстві в цілому.

Постановка проблеми. Сучасний ринок праці висуває високі вимоги до якості підготовки фахівців, очікуючи від них не лише ґрунтовних теоретичних знань, але й практичних умінь та навичок, що можуть бути відразу застосовані у професійній діяльності. Система фахової освіти повинна забезпечувати підготовку висококваліфікованих спеціалістів, здатних до постійного професійного вдосконалення та адаптації до мінливих умов ринку праці.

Проте сьогодні спостерігається значний дисбаланс між попитом та пропозицією на ринку фахових освітніх послуг. Відсутність своєчасної та адекватної реакції з боку системи фахової освіти на трансформації економіки призводить до того, що пропозиція професійних кадрів із певним рівнем освіти часто не відповідає реальним потребам роботодавців. Вирішення цієї проблеми можливе лише за умови налагодження ефективної взаємодії між ринком праці та ринком фахових освітніх послуг.

У цьому контексті актуалізується необхідність застосування маркетингового підходу до управління наданням фахових освітніх послуг, що дозволить закладам освіти визначати та формувати освітні продукти відповідно до потреб споживачів. Ринкові умови функціонування освітньої галузі зумовлюють потребу у дослідженні характеристик, особливостей та структури ринку фахових освітніх послуг, визначенні його суб'єктів та встановленні взаємозв'язків з іншими ринками, зокрема з ринком праці.

Проблема полягає в необхідності розробки та впровадження маркетингових механізмів в управління наданням фахових освітніх послуг для забезпечення їх відповідності вимогам усіх зацікавлених сторін: здобувачів освіти, закладів освіти, роботодавців та держави.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні та практичні аспекти функціонування ринку освітніх послуг є предметом активних наукових досліджень як зарубіжних, так і вітчизняних вчених. Фундаментальні засади маркетингу в освіті закладено в працях Ф. Котлера та К. Фокса [1], які розробили концепцію стратегічного маркетингу для навчальних закладів і запропонували системний підхід до аналізу освітнього ринку та позиціонування освітніх установ. Ці ідеї були розвинуті в роботах Б. Яворські та А. Колі [2; 3], які сформулювали принципи ринкової орієнтації, а також Дж. Нарвера та С. Слейтера [4; 5],

які обґрунтували прямий зв'язок між маркетинговою орієнтацією організації та її результативністю. Серед вітчизняних дослідників вагомий внесок у розвиток теорії маркетингу освітніх послуг зробила Т. Є. Оболенська [6], яка першою в Україні ґрунтовно проаналізувала особливості маркетингової діяльності закладів освіти та запропонувала методологічні підходи до формування їхньої ефективної маркетингової стратегії.

Специфіка ринку освітніх послуг як системи економічних відносин між різними суб'єктами щодо купівлі-продажу освітніх послуг детально досліджена в роботах О. А. Карпюк [7], В. Ю. Дмитрієва [8], А. І. Кузьмінського [9] та Р. Патори [10]. Ці автори розглядають заклад освіти як активного учасника ринкових відносин, який повинен адаптуватися до мінливих умов зовнішнього середовища та орієнтуватися на задоволення потреб споживачів освітніх послуг. Особливу увагу дослідники приділяють взаємозв'язку ринку освітніх послуг із ринком праці, що досліджено в працях Л. М. Ільч [11], Н. І. Холявко [12] та Т. Ю. Огаренко [13]. Вони обґрунтовують необхідність маркетингових досліджень для виявлення потреб роботодавців та прогнозування попиту на фахівців різних спеціальностей.

Практичні аспекти впровадження маркетингового підходу в управління закладами освіти розглянуто в роботах О. М. Перехейди [14], А. В. Мазура [15], Л. Калініної [16], М. О. Люшина [17] та О. Г. Козлової [18]. Автори пропонують конкретні інструменти маркетинг-орієнтованого управління закладами освіти, включаючи методи дослідження ринку, формування освітніх продуктів, ціноутворення, просування та позиціонування закладів освіти на ринку освітніх послуг.

Останніми роками особливого значення набувають дослідження у сфері цифрової трансформації маркетингової діяльності закладів освіти. Зокрема, В. Лифар та А. Мізін [19] досліджують використання інструментів цифрового маркетингу у формуванні іміджу закладів вищої освіти в Україні. Вплив діджиталізації на розвиток комунікаційної політики закладів освіти ґрунтовно проаналізовано в роботі В. В. Лойко та Є. М. Лойко [20]. Особливості формування та реалізації маркетингової комунікативної стратегії в умовах діджиталізації розглядаються в дослідженні Є. М. Лойко [21]. Комплексне дослідження проблематики цифровізації закладу освіти як ефективної моделі управління якістю надання освітніх послуг представлено в роботі А. Малахова та О. Хмельної [22], які обґрунтовують необхідність впровадження цифрових технологій у всі аспекти діяльності закладів освіти, в тому числі в маркетинговій діяльності.

Втім, незважаючи на значну кількість досліджень у сфері маркетингу освітніх послуг та функціонування ринку освіти, недостатньо вивченими залишаються питання практичного застосування маркетингового підходу до управління наданням саме фахових освітніх послуг в умовах трансформації освітньої системи України.

Формулювання цілей статті. Метою статті є теоретичне обґрунтування та визначення особливостей маркетингового підходу до управління наданням фахових освітніх послуг.

Відповідно до поставленої мети в статті були виконані такі завдання:

1. Визначено сутність та основні характеристики сучасного ринку освітніх послуг.

2. Охарактеризовано суб'єктів ринку фахових освітніх послуг та їхні функції.
3. Проаналізовано взаємозв'язок ринку фахових освітніх послуг із суміжними ринками.
4. Визначено методологічні засади дослідження ринку фахових освітніх послуг.
5. Обґрунтовано практичні рекомендації щодо впровадження маркетингових інструментів в управління наданням фахових освітніх послуг.

Виклад основного матеріалу. Освітні послуги являють собою унікальну категорію економічних благ з дуалістичною природою, поєднуючи економічні та соціальні аспекти. Складна структура системи освіти та різноманіття її видів унеможливають механічне перенесення загальних ринкових концепцій на сферу освітніх послуг. Освітні послуги є суспільним благом, оскільки вони належать до категорії послуг, покликаних задовольняти колективні потреби.

Ринок освітніх послуг доцільно трактувати як інтегровану систему економічних відносин між різноманітними суб'єктами щодо купівлі-продажу освітніх послуг, що формуються у процесі динамічної взаємодії попиту з боку споживачів та пропозиції від закладів освіти. Комплексний аналіз наукових джерел дозволяє систематизувати підходи до визначення цього поняття (табл. 1), виокремлюючи економічні, соціальні та інституційні аспекти функціонування ринку освітніх послуг.

Таблиця 1

Визначення поняття «ринок освітніх послуг»

Автор	Трактування
Оболєньська Т. Є. [6]	Ринок освітніх послуг – це система відносин (економічних, соціальних, правових, організаційних), які забезпечують виробництво, реалізацію, споживання освітніх послуг, тобто процес відтворення робочої сили та розвитку особистості.
Карпюк О. А. [7]	Ринок освітніх послуг – це сукупність економічних взаємовідносин, що складаються між різнорівневими суб'єктами з приводу купівлі-продажу освітніх послуг.
Дмитрієв В. Ю. [8]	Ринок освітніх послуг – це система соціально-економічних відносин між навчальними закладами і споживачами з метою продажу та купівлі освітніх послуг.
Кузьмінський А. І. [9]	Ринок освітніх послуг – економічний простір, на якому взаємодіють попит на освітні послуги з боку основних господарюючих суб'єктів (окремих громадян, домогосподарств, підприємств й організацій, держави) і їх пропозиція від різних освітніх закладів.
Патора Р. [10]	Ринок освітніх послуг – це система відносин у ринкових умовах з приводу купівлі-продажу освітньої послуги, яка в силу цього стає товаром.

Джерело: узагальнено авторами на основі [6-10]

Методологічною основою дослідження ринку фахових освітніх послуг є комплексний підхід, що поєднує інструменти економічного, маркетингового та соціологічного аналізу. У межах нашого дослідження були використані такі методи:

- системний аналіз для вивчення структури та взаємозв'язків елементів ринку фахових освітніх послуг;
- компаративний аналіз для порівняння різних підходів до визначення поняття «ринок освітніх послуг»;

- структурно-функціональний аналіз для дослідження функцій суб'єктів ринку фахових освітніх послуг;
- графічний метод для візуалізації взаємозв'язків між різними ринками та суб'єктами;
- емпіричні методи для збору та аналізу даних щодо функціонування ринку фахових освітніх послуг.

Проведене дослідження дозволило виявити основні тенденції та особливості функціонування ринку фахових освітніх послуг в Україні, що відображено в таких результатах.

Основні характеристики сучасного ринку освітніх послуг:

1. Ринок освітніх послуг пов'язаний зі значним ризиком, що зумовлено неможливістю точно прогнозувати попит на освітні послуги. Особливо це стосується нових освітніх послуг (нової спеціальності, освітньої програми або форми навчання). Прогноз на освітню інновацію складний через відсутність механізму її тестування, тому виведення на ринок цієї послуги пов'язане з ризиком, який може бути невиправданим.

2. Пропозиція на ринку освітніх послуг є величиною граничною, нееластичною і тому більш визначеною, ніж попит. Швидко збільшити обсяги надаваних освітніх послуг у разі значного збільшення попиту на них вкрай складно.

3. Попит на освітні послуги більш індивідуальний, він передре їх виробництву і в основі своїй важко піддається взаємозамінності. Зробити послугу в тому вигляді, в якому вона була б ідентична попиту на неї, практично неможливо.

4. На відміну від товарів, споживання освітніх послуг практично не має часових обмежень, що наочно підтверджується концепцією безперервної освіти.

5. Традиційний локальний характер ринку освітніх послуг визначається нерозривністю попиту та пропозиції. Але останнім часом, з огляду на масовий перехід на дистанційне навчання, це не є безперечним фактом для сучасного ринку освітніх послуг.

7. Для сфери освітніх послуг характерна асиметричність інформації. Споживач, на жаль, часто не володіє повною інформацією про якість наданої послуги й орієнтується на попередній досвід, що створює певну невизначеність на даному ринку.

8. Вітчизняний ринок освітніх послуг фактично сформувався в умовах переходу до ринкових механізмів господарювання та існує в ринкових умовах.

9. Цифрова трансформація освіти суттєво змінює характер надання освітніх послуг, розширюючи їх доступність та відкриваючи нові можливості для персоналізації навчання. За даними опитування, проведеного Державною службою статистики України у 2023 році, 78 % закладів фахової освіти в Україні впровадили елементи дистанційного навчання, що свідчить про активну діджиталізацію освітнього процесу [23].

10. Зростає конкуренція на ринку освітніх послуг, особливо у сегменті фахової освіти, що посилюється появою нових форм та провайдерів освітніх послуг, зокрема онлайн-платформ, корпоративних університетів та міжнародних освітніх організацій.

Суб'єкти ринку освітніх послуг та їхні функції

Учасниками ринку освітніх послуг, що вступають в економічні відносини, є: виробники або постачальники освітніх послуг, споживачі освітніх послуг, посередники, державні та громадські інститути та структури, причетні до просування освітніх послуг на ринку (рис. 1).



Рис. 1. Система суб'єктів ринку освітніх послуг

Джерело: власна розробка авторів

Значна кількість освітніх послуг має професійну (фахову) спрямованість, тобто належить до сегменту професійної (фахової) освіти. *Фахова освіта* – здобуття кваліфікації за відповідним напрямом підготовки або спеціальністю, що являє собою цілеспрямований процес навчання наявних (працюючих) і потенційних (наприклад, студентів) працівників професійних знань та вмінь з метою набуття навичок, необхідних для виконання певних видів завдань у конкретній спеціальності.

Основні форми здобуття фахової освіти: навчання у вищих і спеціалізованих навчальних закладах освіти, стажування на курсах підвищення кваліфікації, удосконалення професійної майстерності на виробництві. Крім того, існує багато інших підходів до професійного розвитку, а саме: консультації, тренінги, спільні практики, вивчення уроків, наставництво (менторство), технічна допомога [24].

Виробниками (постачальниками) освітніх послуг виступають фізичні або юридичні особи, які мають дозвіл (ліцензію) на цей вид діяльності та виходять на ринок із диференційованою пропозицією. З позицій ринку праці інтерес становлять фахові освітні послуги з першого по третій рівні освіти, що надаються закладами професійної та вищої (в тому числі післядипломної) освіти.

Заклади фахової освіти виступають у ролі суб'єктів, що формують пропозицію та надають освітні послуги. З позицій маркетингового підходу до основних функцій закладу фахової освіти входить: надання освітніх послуг, передача знань здобувачам освіти, формування у них умінь та навичок за фахом; надання додаткових освітніх послуг, що формують особистість майбутнього фахівця; надання інформаційно-посередницьких послуг потенційними та реальним здобувачам освіти та роботодавцям, включаючи погодження з ними умов майбутньої роботи, розмірів, порядку та джерел фінансування послуг.

Споживачі освітніх послуг формують попит на освітні послуги та задовольняють свої бажання, під якими розуміють потреби, що набули конкретної форми відповідно

до рівня культури та особистості індивіда. Споживачів освітніх послуг умовно можна поділити на споживачів-клієнтів та споживачів-покупців освітніх послуг.

Споживачі-клієнти – це особи, які беруть безпосередньо участь у процесі навчання, або здобувачі фахової освіти. Відповідно до [25] здобувачі освіти – вихованці, учні, студенти, курсанти, слухачі, стажисти, аспіранти (ад'юнкти), докторанти, інші особи, які здобувають освіту за будь-яким видом та формою здобуття освіти. Окремо виділимо *здобувачів фахової освіти* – студентів, курсантів, слухачів, стажистів, аспірантів (ад'юнктів), докторантів, інших осіб, які здобувають фахову освіту за будь-яким видом та формою здобуття освіти.

У процесі надання освітніх послуг, який є одночасно і процесом їх споживання, фізичним особам, які навчаються, тобто безпосереднім споживачам, належить особлива роль. Ефективність освітніх послуг великою мірою залежить від активного включення осіб, що навчаються, а саме здобувачів, у процес їх надання, який має персоналізований характер. Здобувач освітніх послуг є не просто матеріальним накопичувачем знань, але і їх носієм, володарем, користувачем та кінцевим споживачем, який надалі може їх використовувати в професійній діяльності за фахом.

Здобувач здійснює вибір своєї майбутньої спеціальності, термінів, місця та форми навчання, вартості та джерел його фінансування, а також вибір майбутнього місця роботи (або наступного рівня освіти) й усього комплексу умов реалізації набутого потенціалу. Здобувач є центральною ланкою, завдяки якому та навколо особистісного вибору якого налагоджують взаємодії всі інші суб'єкти ринку фахової освіти.

Споживач-покупець – це суб'єкт, який приймає рішення про купівлю та проводить оплату освітньої послуги її виробнику. До споживачів-покупців належать фізичні особи або юридичні організації, що здійснюють оплату освітніх послуг. Споживачем-покупцем може виступати держава, роботодавці, самі здобувачі фахової освіти та їхні батьки, родичи тощо. Отже, в якості споживача-клієнта та споживача-покупця може виступати одна й та сама особа.

На ринку фахових освітніх послуг, окрім виробників та споживачів, важливу роль відіграють посередники, а також державні та громадські інститути.

До складу *посередників* входять різноманітні суб'єкти: служби зайнятості, біржі праці, освітні фонди, асоціації закладів освіти та підприємств, спеціальні освітні центри, органи реєстрації, ліцензування та акредитації закладів освіти та інші організації. Усі ці суб'єкти сприяють більш ефективному просуванню освітніх послуг. Функціональне призначення посередників полягає у проведенні маркетингових досліджень ринку освітніх послуг, консультуванні інших суб'єктів щодо стану ринку фахової освіти, участі в процесах акредитації закладів фахової освіти, формуванні каналів збуту, організації продажу освітніх послуг, а також участі у фінансуванні, кредитуванні та інших формах матеріальної й ресурсної підтримки виробників та споживачів освітніх послуг.

Особливе місце в системі ринкових відносин у сфері фахової освіти належить *державі та її органам управління*, які виконують не лише регуляторну, але й стратегічно-координаційну функцію, забезпечуючи збалансований розвиток національної системи фахової освіти відповідно до довгострокових пріоритетів соціально-економічного розвитку країни. До ключових функцій держави належать: формування

стратегічного бачення розвитку фахової освіти; забезпечення якості освітніх послуг через механізми ліцензування та акредитації; моніторинг та оцінювання ефективності закладів освіти; цільове фінансування пріоритетних галузей та створення сприятливого інвестиційного клімату. Застосовуючи комплекс інструментів (державне замовлення, податкові пільги, грантові програми, кредитні механізми), державні органи збалансовують попит і пропозицію на ринку фахових освітніх послуг, стимулюють розвиток перспективних спеціальностей, забезпечують інклюзивність та доступність освіти, підтримують різні її форми (формальну, неформальну та інформальну) для реалізації принципу навчання протягом життя.

Зв'язок ринку фахових освітніх послуг із суміжними ринками

Базою розвитку економіки країни та її економічних успіхів служить зростання рівня фахової освіти населення, а рівень розвитку системи фахової освіти, своєю чергою, залежить від економічного розвитку країни. Звідси випливає, що фахова освіта та економіка співіснують як дві взаємозв'язані та взаємозалежні системи. Фахова освіта створює економіку, економіка розвиває фахову освіту. Як наслідок, формуються зв'язки ринку фахових освітніх послуг із суміжними ринками.

За результатами проведеного дослідження, взаємозв'язок ринку фахових освітніх послуг із суміжними ринками має системний характер та проявляється через соціально-економічні, організаційно-управлінські та інформаційно-комунікаційні відносини. Згідно з даними Державної служби статистики України за 2023 рік, спостерігається дисбаланс між структурою підготовки фахівців та потребами ринку праці в розрізі спеціальностей. Так, надлишок випускників спостерігається у сферах права, економіки, менеджменту, тоді як відчувається дефіцит фахівців інженерно-технічних спеціальностей [23].

З одного боку, фахові освітні послуги є одним із секторів споживчого ринку, з іншого боку, всі елементи споживчого ринку потребують продуктів ринку фахових освітніх послуг у вигляді підготовлених професійних кадрів. Отже, ринок фахових освітніх послуг необхідно розглядати у взаємозв'язку з усіма елементами споживчого ринку. Зв'язок цей є опосередкованим через взаємодію з ринком праці, оскільки ринкова економіка передбачає наявність ринку праці, який формується залежно від потреб споживчого ринку та завдяки існуванню ринку фахових освітніх послуг. Тобто спостерігається взаємна залежність трьох ринків: споживчого ринку, ринку праці та ринку фахових освітніх послуг (рис. 2).

Споживчий ринок, ринок праці та ринок фахових освітніх послуг є суміжними, сегменти більшості суміжних ринків є ринками ресурсів або засобів праці для ринку освітніх послуг. Отже, ринок фахових освітніх послуг є соціально-економічною системою, що задовольняє потреби суспільства у підготовці кваліфікованих професійних кадрів, виступає в ролі ресурсної бази ринку праці. Споживчий ринок, обов'язковим елементом якого є підготовлені професійні кадри, формується за рахунок ресурсів ринку праці.

Нині спостерігається дисбаланс між попитом та пропозицією на ринку фахових освітніх послуг. Через відсутність своєчасної та адекватної реакції з боку системи фахової освіти на зміни економіки пропозиція професійних кадрів з певним рівнем освіти не відповідає попиту на ринку праці. Вирішити проблему, що виникла, можливо завдяки налагодженню взаємодії між ринком праці та ринком фахових освітніх послуг.

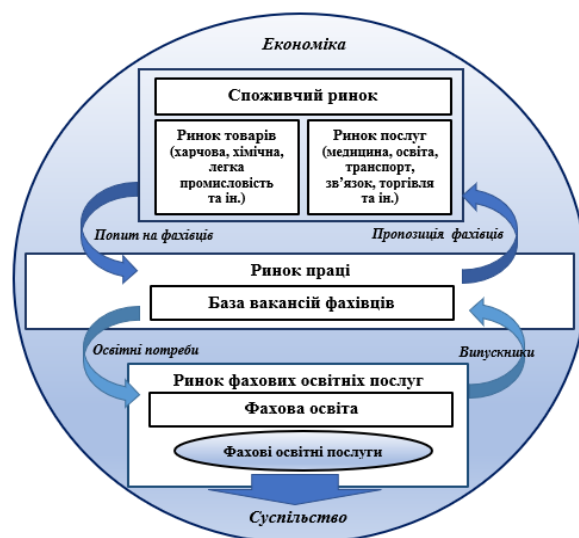


Рис. 2. Взаємозв'язок ринку фахових освітніх послуг із суміжними ринками
Джерело: власна розробка авторів

Ринок фахових освітніх послуг пов'язаний із ринком праці опосередковано, через освітні потреби, які виступають одночасно найважливішими чинниками потенційного попиту на ринку фахової освіти та потенційної пропозиції ринку праці.

Вирішити проблему взаємодії ринку праці та ринку фахових освітніх послуг неможливо без урахування інтересів безпосередніх споживачів освітніх послуг, які мають свої цілі, завдання, мотивацію у виборі професії та сфери трудової діяльності за фахом. Заклади фахової освіти, надаючи освітні послуги, повинні також враховувати вимоги роботодавців, стан справ у сфері зайнятості та на регіональних ринках праці. Це обґрунтовує необхідність застосування маркетингових механізмів у визначенні характеристик освітньої послуги як продукту освітньої діяльності.

Маркетинг-орієнтоване управління наданням освітніх послуг являє собою управлінську діяльність закладу освіти, сконцентровану на визначенні потреб та пропозиції на ринку освітніх послуг, що відрізняються від товарів – аналогів конкурентів – або мають виняткові переваги над конкуруючими товарами [19]. Маркетинг-орієнтоване управління передбачає застосування маркетингового підходу до управління процесом наданням освітніх послуг, спрямованого на визначення споживчого запиту на послуги, тобто відповіді на питання: якого рівня, якої якості, за який термін, якої вартості та в яких умовах споживач бажає отримати освітню послугу. У результаті проведення маркетингового дослідження ринку праці заклади фахової освіти повинні фіксувати слабкі місця, невідповідність попиту та пропозиції на ринку праці та моделювати споживчі переваги, на основі яких потрібно будувати свою асортиментну політику, маркетингову діяльність.

Система фахової освіти має стати сполучною ланкою між двома найважливішими атрибутами ринку праці – попитом та пропозицією робочої сили, що готує фахівців під вимоги роботодавців для їх якнайшвидшого та ефективного

працевлаштування, відповідно також до їхніх внутрішніх прагнень та інтересів суспільства.

Основна ціль фахової освіти – підготовка кваліфікованого професіонала відповідного рівня та профілю, конкурентоспроможного на ринку праці, компетентного, відповідального, вільно володіючого своєю професією та обізнаного у суміжних галузях діяльності, здатного до ефективної роботи за спеціальністю на рівні світових стандартів, готового до постійного професійного зростання, соціальної та професійної мобільності тощо.

Для успішного функціонування закладу фахової освіти необхідний постійний розвиток пропозиції освітніх послуг, удосконалення їх змісту та опанування нових методів навчання. Завдяки цьому реалізується основна, соціально значуща мета будь-якого закладу фахової освіти – донести до споживачів освітніх послуг науково-технічні знання та передовий досвід, які б сприяли інтелектуальному розвитку та освіті здобувачів.

Дискусійним є питання стосовно характеру відносин представників ринку фахової освіти та ринку праці. Ринкові відносини передбачають обмін цінностями між двома та більше сторонами, тобто здійснення угоди між учасниками ринку. Заклад фахової освіти є виробником освітніх послуг, з якими він виходить на ринок фахової освіти. З ринком праці він пов'язаний опосередковано, завдяки результатам своєї освітньої діяльності, втіленим у знаннях, уміннях та навичках випускників (рис. 3).

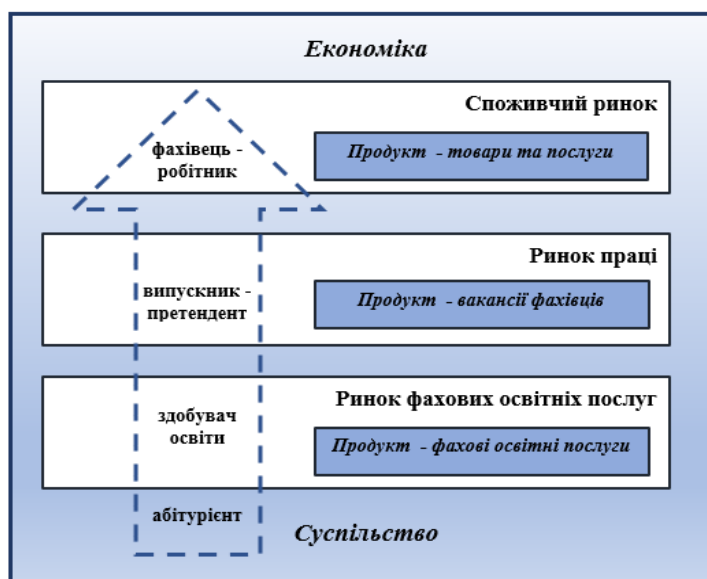


Рис. 3. Формування продуктів суміжних ринків

Джерело: власна розробка авторів

Заклад фахової освіти не пропонує ринку праці фахівців – випускники самостійно пропонують свою робочу силу на ринку праці підприємствам та організаціям, а ті оцінюють кваліфікацію цієї робочої сили у вигляді стартових зарплат та інших умов найму. Заклад фахової освіти в результаті цієї угоди не отримує

прямих матеріальних вигод. Він очікує отримати відгук від своєї цільової аудиторії у вигляді покращення іміджу та піднесення престижу закладу освіти, збільшення кількості абітурієнтів за рахунок зростання попиту на освітні послуги, що надаються закладом, зміцнення свого конкурентного становища.

Заклад фахової освіти зацікавлений в тому, щоб його освітні послуги якомога повніше відповідали вимогам ринку праці, а випускники якнайповніше засвоювали програму. Тому він зацікавлений у вивченні цільового ринку праці, оскільки, по-перше, ринок праці визначає основні стандарти якості фахової освіти і, по-друге, перспектива працевлаштування молодих фахівців є важливим мотивом вибору закладу потенційними абітурієнтами.

Практичні рекомендації щодо впровадження маркетингових інструментів

На основі проведеного дослідження пропонуємо конкретні практичні рекомендації щодо впровадження маркетингового підходу в управління наданням фахових освітніх послуг:

Розробка та впровадження маркетингової інформаційної системи закладу фахової освіти, що включатиме: систематичний моніторинг ринку праці та вимог роботодавців; відстеження тенденцій у розвитку галузей економіки; аналіз конкурентного середовища; дослідження потреб та очікувань споживачів освітніх послуг.

Формування портфеля освітніх послуг на основі результатів маркетингових досліджень: регулярний перегляд та оновлення освітніх програм відповідно до вимог ринку праці; розробка нових освітніх продуктів з урахуванням перспективних потреб економіки; впровадження гнучких модульних програм, що дозволяють швидко адаптуватися до змін зовнішнього середовища.

Використання сучасних цифрових технологій у маркетинговій діяльності: розвиток онлайн-присутності закладу фахової освіти через сайт та соціальні мережі; впровадження CRM-систем для управління відносинами з ключовими стейкхолдерами; використання аналітичних інструментів для оцінки ефективності маркетингових заходів.

Налагодження стратегічного партнерства із роботодавцями: створення спільних освітніх проектів та програм дуальної освіти; залучення представників бізнесу до розробки та оцінки освітніх програм; організація стажувань та практик на базі підприємств-партнерів.

Розвиток системи маркетингових комунікацій: формування та просування бренду закладу фахової освіти; проведення регулярних PR-заходів (дні відкритих дверей, освітні виставки, конференції); використання таргетованої реклами для залучення цільових аудиторій.

Запропоновані рекомендації дозволять закладам фахової освіти ефективно впроваджувати маркетинговий підхід до управління освітньою діяльністю та підвищувати свою конкурентоспроможність на ринку освітніх послуг.

Висновки. Ринок освітніх послуг являє собою систему економічних відносин між суб'єктами освітнього процесу щодо купівлі-продажу освітніх послуг. До ключових характеристик сучасного ринку освітніх послуг належать: високий рівень невизначеності у прогнозуванні попиту, нееластичність пропозиції, індивідуалізація попиту, відсутність часових обмежень у споживанні та асиметричність інформації, що зумовлює необхідність маркетингового підходу до управління освітньою діяльністю.

Основними суб'єктами ринку фахових освітніх послуг є: виробники (заклади фахової освіти), споживачі (здобувачі освіти та організації, що здійснюють оплату), посередники (служби зайнятості, асоціації, освітні центри), а також держава та її органи управління. Кожен суб'єкт виконує специфічні функції у забезпеченні ефективного функціонування ринку фахових освітніх послуг та підготовці кваліфікованих фахівців.

Ринок фахових освітніх послуг тісно взаємопов'язаний зі споживчим ринком та ринком праці. З одного боку, фахові освітні послуги є сектором споживчого ринку, з іншого – формують ресурсну базу для ринку праці. Дисбаланс між попитом та пропозицією на ринку праці виникає через недостатню оперативну реакцію системи фахової освіти на зміни в економіці, що підкреслює важливість налагодження ефективної взаємодії між цими ринками.

Проведене дослідження дозволило обґрунтувати методологічні засади вивчення ринку фахових освітніх послуг, що включають комплексне використання системного, компаративного та структурно-функціонального аналізу. На основі емпіричних даних виявлено основні тенденції розвитку ринку фахових освітніх послуг в умовах цифрової трансформації освіти та розроблено практичні рекомендації щодо впровадження маркетингових інструментів в управління наданням фахових освітніх послуг.

Маркетинговий підхід до управління наданням фахових освітніх послуг є важливим інструментом підвищення конкурентоспроможності закладів освіти та забезпечення відповідності якості підготовки фахівців вимогам ринку праці. Впровадження маркетингового підходу дозволяє закладам фахової освіти своєчасно реагувати на зміни у зовнішньому середовищі, враховувати потреби споживачів та вдосконалювати освітні програми, що сприяє подоланню дисбалансу між попитом і пропозицією на ринку праці.

ЛІТЕРАТУРА

1. Котлер Ф., Фокс К. Стратегічний маркетинг для навчальних закладів / пер. з англ. Київ : УАМ, 2011. 580 с.
2. Jaworski B.J., Kohli A.K. Market Orientation: Antecedents and Consequences. *Journal of Marketing*. 1993. Vol. 57. № 3. P. 53–70. <https://doi.org/10.2307/1251854>
3. Kohli A.K., Jaworski B.J. Market Orientation: The Construct, Research Propositions and Managerial Implications. *Journal of Marketing*. 1990. Vol. 54. № 2. P. 1–18. <https://people.duke.edu/~moorman/Marketing-Strategy-Seminar-2015/Session%202/Jaworski%20and%20Kohli.pdf>
4. Narver J.C., Slater S.F., MacLachlan D.L. Responsive and Proactive Market Orientation and New-Product Success. *Journal of Product Innovation Management*. 2004. № 21. P. 334–347. <http://dx.doi.org/10.1111/j.0737-6782.2004.00086.x>
5. Narver J.C., Slater S.F. The Effect of a Market Orientation on Business Profitability. *Journal of Marketing*. 1990. Vol. 54. № 4. P. 20–35. <http://dx.doi.org/10.2307/1251757>
6. Оболенська Т.Є. Маркетинг освітніх послуг: вітчизняний і зарубіжний досвід : монографія. Київ : КНЕУ, 2001. 208 с.

7. Карпюк О.А. Теоретичні аспекти ринку освітніх послуг. *Наука й економіка*. 2009. № 2(14). С. 297–299.
8. Дмитрієв В.Ю. Особливості ринку освітніх послуг у системі вищої освіти. *Народна освіта*. 2012. Випуск № 3(18). URL: https://www.narodnaosvita.kiev.ua/?page_id=960
9. Кузьмінський А.І. Освітній ринок як фактор розвитку освітньої системи. *Педагогіка вищої та середньої школи*. 2013. Вип. 37. С. 113–117.
10. Патора Р. Ринок освіти в системі кадрового забезпечення стратегічного розвитку країни. Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2002. 336 с.
11. Ільч Л.М. Взаємодія ринків праці та освіти: сутність, характерні риси та модель функціонування. *Економіка та держава*. 2017. № 4. С. 69–74.
12. Холяк Н.І. Взаємодія ринків праці та освіти: тенденції та перспективи розвитку. *Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету. Серія «Економіка і менеджмент»*. 2016. Вип. 22. С. 36–39.
13. Огаренко Т.Ю. Аналіз особливостей попиту на освітні послуги з метою прогнозування. *Вища школа*. 2009. № 10. С. 86–98.
14. Перехейда О.М. Платні освітні послуги. *Завучу. Усе для роботи*. 2017. № 9/10. С. 16–27.
15. Мазур А.В. Інструменти позиціонування навчального закладу на ринку освітніх послуг. *Управління школою*. 2012. № 19/21. С. 45–49.
16. Калініна Л. Управління Новою українською школою. Порівняльна характеристика концептуальних змін. *Директор школи*. 2017. № 1/2. С. 12–21.
17. Люшин М.О. Маркетинговий підхід до управління сучасним закладом загальної середньої освіти. *Вісник Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького. Серія «Педагогічні науки»*. 2018. № 3. С. 22–29. URL: <https://ped-ejournal.cdu.edu.ua/article/view/2913>
18. Козлова О.Г., Козлов Д.О., Молчанова К.В. Інноваційні основи маркетингової діяльності сучасного керівника професійно-технічного навчального закладу. Самореалізація пізнавально-творчого і професійного потенціалу особистості в інноваційній освіті : монографія / за ред. проф. М.О. Лазарева. Суми : ФОП Цьома С.П., 2016. С. 171–188.
19. Лифар В., Мізін А. Використання інструментів цифрового маркетингу у формуванні іміджу закладів вищої освіти в Україні. *Věda a perspektivy*. 2023. № 4(23). С. 23–36. DOI: [https://doi.org/10.52058/2695-1592-2023-4\(23\)-23-36](https://doi.org/10.52058/2695-1592-2023-4(23)-23-36)
20. Лойко В.В., Лойко Є.М. Вплив діджиталізації на розвиток комунікаційної політики закладів освіти. *Європейський науковий журнал Економічних та Фінансових інновацій*. 2021. № 2(8). С. 79–90. DOI: <https://doi.org/10.32750/2021-0208>
21. Лойко Є.М. Діджиталізація маркетингової комунікативної стратегії підприємства. *Вчені записки Університету «КРОК»*. 2021.

- № 4(64). С. 135–142. DOI: <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2021-64-135-142>
22. Малахов А., Хмельна О. Діджиталізація закладу освіти як ефективна модель управління якістю надання освітніх послуг. *Грааль науки*. 2021. № 10. С. 396–409. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.19.11.2021.079>
23. Статистичний щорічник України, 2023 рік / Державна служба статистики України. Київ, 2023. 268 с. URL: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2023/zb/11/year_23_u.pdf
24. Ковтун Т.А., Меркт О.В., Фіногенова І.О. Маркетинг-орієнтоване управління наданням фахових освітніх послуг. *Розвиток транспорту*. 2024. № 1(20). С. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.1-20.03>
25. Про освіту : Закон України від 05.09.2017 № 2145-VIII URL: <https://sqe.gov.ua/law/zakon-ukraini-pro-osvitu/>

REFERENCES

1. Kotler, F., Fox, K. (2011). Strategic marketing for educational institutions [Stratehichnyi marketynh dlia navchalnykh zakladiv] / translated from English. Kyiv : UAM, 580 [in Ukraine].
2. Jaworski, B.J., Kohli, A.K. (1993). Market Orientation: Antecedents and Consequences. *Journal of Marketing*. Vol. 57, 3, 53–70. <https://doi.org/10.2307/1251854>
3. Kohli, A.K., Jaworski, B.J. (1990). Market Orientation: The Construct, Research Propositions and Managerial Implications. *Journal of Marketing*. Vol. 54, 2, 1–18. <https://people.duke.edu/~moorman/Marketing-Strategy-Seminar-2015/Session%202/Jaworski%20and%20Kohli.pdf>
4. Narver, J.C., Slater, S.F., MacLachlan, D.L. (2004). Responsive and Proactive Market Orientation and New-Product Success. *Journal of Product Innovation Management*, 21, 334–347. <http://dx.doi.org/10.1111/j.0737-6782.2004.00086.x>
5. Narver, J.C., Slater, S.F. (1990). The Effect of a Market Orientation on Business Profitability. *Journal of Marketing*. Vol. 54, 4, 20–35. <http://dx.doi.org/10.2307/1251757>
6. Obolenska, T.E. (2001). Marketing of educational services: domestic and foreign experience [Marketynh osvitykh posluh: vitchyzniani i zarubizhnyi dosvid] : monograph. Kyiv : KNEU. 208. [in Ukraine].
7. Karpiuk, O.A. (2009). Theoretical aspects of the educational services market [Teoretychni aspekty rynku osvitykh posluh]. *Science and economics*, 2(14), 297–299 [in Ukraine].
8. Dmytriiev, V.Yu. (2012). Features of the educational services market in the higher education system [Osoblyvosti rynku osvitykh posluh u systemi vyshchoi osvity]. *Narodna osvita*, 3(18). URL: https://www.narodnaosvita.kiev.ua/?page_id=960 [in Ukraine].
9. Kuzminskyi, A.I. (2013). Educational market as a factor in the development of the educational system [Osvitnii rynek yak faktor rozvytku osvitynoi

- systemy]. Pedagogy of higher and secondary school, 37, 113–117. [in Ukraine].
10. Patora, R. (2002). Education market in the system of personnel support for strategic development of the country [Rynok osvity v systemi kadrovoho zabezpechennia stratedichnoho rozvytku krainy]. Lviv: Lviv Polytechnic National University Publishing House. 336 [in Ukraine].
 11. Ilich, L.M. (2017). Interaction of labor and education markets: essence, characteristics and model of functioning [Vzaiemodiia rynkiv pratsi ta osvity: sutnist, kharakterni rysy ta model funktsionuvannia]. Economy and state, 4, 69–74 [in Ukraine].
 12. Kholiavko, N.I. (2016). Interaction of labor and education markets: trends and prospects for development [Vzaiemodiia rynkiv pratsi ta osvity: tendentsii ta perspektyvy rozvytku]. Scientific Bulletin of the International Humanitarian University. Series: Economics and Management, 22, 36–39 [in Ukraine].
 13. Oharenko, T.Yu. (2009). Analysis of the features of demand for educational services for forecasting purposes [Analiz osoblyvostei popytu na osvitni posluhy z metoiu prohnouzuvannia]. Higher School, 10, 86–98 [in Ukraine].
 14. Pereheida, O.M. (2017). Paid educational services [Platni osvitni posluhy]. Head teacher Everything for work, 9/10, 16–27 [in Ukraine].
 15. Mazur, A.V. (2012). Tools for positioning an educational institution on the market of educational services [Instrumenty pozytsionuvannia navchalnoho zakladu na rynku osvitnikh posluh]. School management, 19/21, 45–49 [in Ukraine].
 16. Kalinina, L. (2017). Management of the New Ukrainian School. Comparative characteristics of conceptual changes [Upravlinnia Novoiu ukrainskoiu shkoloiu. Porivnialna kharakterystyka kontseptualnykh zmin]. School Director, 1/2, 12–21 [in Ukraine].
 17. Lyushin, M.O. (2018). Marketing approach to management of a modern institution of general secondary education [Marketynhovyi pidkhid do upravlinnia suchasnym zakladom zahalnoi serednoi osvity]. Bulletin of the Cherkasy National University named after Bohdan Khmelnytskyi. Series: «Pedagogical Sciences», 3, 22–29. URL: <https://ped-ejournal.cdu.edu.ua/article/view/2913> [in Ukraine].
 18. Kozlova, O.G., Kozlov, D.O., Molchanova, K.V. (2016). Innovative basics of marketing activity of a modern head of a vocational educational institution. Self-realization of the cognitive-creative and professional potential of the individual in innovative education [Innovatsiini osnovy marketynhovoii diialnosti suchasnoho kerivnyka profesiino-tekhnichnoho navchalnoho zakladu. Samorealizatsiia piznavalno-tvorchoho i profesiinoho potentsialu osobystosti v innovatsiinii osviti]: monograph / edited by Prof. M.O. Lazarev. Sumy: FOP Tsyoma S.P., 171–188. [in Ukraine].
 19. Lyfar, V., Mizin, A. (2023). Use of digital marketing tools in forming the image of higher education institutions in Ukraine [Vykorystannia instrumentiv tsyfrovoho marketynhu u formuvanni imidzhu zakladiv

- vysshchoi osvity v Ukraini]. *Věda a perspektivy*, 4(23), 23–36. DOI: [https://doi.org/10.52058/2695-1592-2023-4\(23\)-23-36](https://doi.org/10.52058/2695-1592-2023-4(23)-23-36) [in Ukrainian].
20. Loiko, V.V., Loiko, Ye.M. (2021). The impact of digitalization on the development of communication policy of educational institutions [Vplyv didzhitalizatsii na rozvytok komunikatsiinoi polityky zakladiv osvity]. *European Scientific Journal of Economic and Financial Innovation*, 2(8), 79–90. DOI: <https://doi.org/10.32750/2021-0208> [in Ukrainian].
 21. Loiko, Ye.M. (2021). Digitalization of marketing communication strategy of the enterprise [Didzhitalizatsiia marketynhovoï komunikatyvnoi stratehii pidpriemstva]. *Scientific notes of "KROK" University*, 4(64), 135–142. DOI: <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2021-64-135-142> [in Ukrainian].
 22. Malakhov, A., Khmelna, O. (2021). Digitalization of an educational institution as an effective model of quality management of educational services [Didzhitalizatsiia zakladu osvity yak efektyvna model upravlinnia yakistiu nadannia osvitnikh posluh]. *Grail of Science*, 10, 396–409. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.19.11.2021.079> [in Ukrainian].
 23. State Statistics Service of Ukraine (2023). Statistical Yearbook of Ukraine, 2023 [Statystychnyi shchorichnyk Ukrainy, 2023]. Kyiv, 268 p. URL: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2023/zb/11/year_23_u.pdf [in Ukrainian].
 24. Kovtun, T.A., Merkt, O.V., Finohenova, I.O. (2024). Marketing-oriented management of professional educational services [Marketynh-oriientovane upravlinnia nadanniam fakhovykh osvitnikh posluh]. *Transport Development*, 1(20), 27–34. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.1-20.03> [in Ukrainian].
 25. Zakon Ukrainy № 2145-VIII «Pro osvitu». URL: <https://sqe.gov.ua/law/zakon-ukraini-pro-osvitu/> [in Ukrainian].

**ВПЛИВ ПРАВИЛ ІМО 2023 РОКУ СТОСОВНО СИСТЕМИ ТОРГІВЛІ
ВИКИДАМИ ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ (EU ETS) НА УЧАСНИКІВ
РИНКУ МОРСЬКИХ СУХОВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ**

І.О. Лапкіна¹, І.Є. Сєногонов²

¹д. е. н., професор,

завідувач кафедри управління логістичними системами і проектами,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-7468-8993

²ст. викладач кафедри управління логістичними системами і проектами,
директор Genconis LLC,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0009-0007-1853-8019

Анотація

Вступ. У цій статті досліджується вплив правил ІМО 2023 року стосовно системи торгівлі викидами Європейського Союзу (EU ETS) на морські суховантажні перевезення з особливим акцентом на практиці фрахтування. EU ETS, запроваджена 1 січня 2024 року, має на меті скорочення викидів вуглецю шляхом інтеграції морського транспорту у свою нормативну базу. **Мета.** Дослідження вивчає безпосередні і довгострокові виклики, з якими стикаються компанії, що займаються морським перевезенням насипних вантажів, долаючи складні ситуації відповідності цій схемі. Дослідження сприяє глибшому розумінню впливу схеми на морський транспорт та пропонує практичні рекомендації для зацікавлених сторін галузі щодо вдосконалення відповідності та ефективності роботи. **Результати.** Проаналізовані конкретні регуляторні зміни, які були внесені оновленнями ІМО 2023 щодо скорочення викидів GHG, їхні відмінності від попередніх нормативних актів; з'ясована роль EEXI та CII в контексті скорочення викидів GHG; оцінено очікувані економічні наслідки оновлених правил для власників і операторів сухих вантажів, зокрема, з точки зору щоденних операцій, витрат і прибутковості та визначено рівень впливу нових правил на конкурентоспроможність і ринкове позиціонування суднових брокерських компаній у секторі перевезення сухих навалочних вантажів, враховуючи їх взаємодію з власниками та операторами сухих вантажів. **Висновки.** Охарактеризовано основні зацікавлені сторони у вирішенні дослідницького питання, рівень їхніх інтересів та впливу на функціонування ETS. Впровадження EU ETS значно впливає на ринок морських суховантажних перевезень і фрахтування у фінансових, операційних і стратегічних аспектах. У фінансовому плані витрати на придбання квот ЄС (EUA) та врахування витрат на викиди CO₂ у фрахтових ставках накладають значний тягар на судноплавні компанії, що призводить до підвищення фрахтових ставок та експлуатаційних витрат.

Ключові слова: Схема Торгівлі Викидами Європейського Союзу, Індекс Енерго-ефективності Існуючих Суден, Індикатор Інтенсивності Викидів Вуглецю.

EUROPEAN UNION EMISSIONS TRADING SYSTEM UNDER IMO
RULES 2023 AND ITS EFFECT ON DRY BULK MARITIME TRANSPORT
MARKET PARTICIPANTS

I.O. Lapkina¹, I.Ye. Syenogonov²

¹Sc.D., Prof.,

¹Head of Logistics and Project Management Department,
Educational and Scientific Institute of Marine Business,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-7468-8993

²CEO of Genconis LLC,

Senior Lecturer at the Logistics and Project Management Department,
Educational and Scientific Institute of Marine Business,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0007-1853-8019

Summary

Introduction. This article examines the effect of the European Union Emissions Trading Scheme (EU ETS) under IMO rules 2023 on dry bulk maritime transport, with a particular focus on chartering practices. The EU ETS, which is entered into force on 1 January 2024, aims to reduce carbon emissions by integrating maritime transport into its regulatory framework. **Objective.** The study examines the immediate and long-term challenges faced by bulk maritime transport companies in overcoming the complexities of compliance with the scheme. It contributes to a deeper understanding of the impact of the scheme on maritime transport and offers practical recommendations for industry stakeholders to improve compliance and operational efficiency. **Results.** The specific regulatory changes introduced by the IMO 2023 updates on GHG emission reductions are analyzed and how they differ from previous regulations; the role of EEXI and CII in the context of GHG emission reductions is clarified; the expected economic consequences of the updated rules for dry cargo owners and operators are assessed, in particular in terms of daily operations, costs and profitability, and the level of impact of the new rules on the competitiveness and market positioning of shipbroking companies in the dry bulk sector, taking into account their interaction with dry cargo owners and operators, is determined. **Conclusions.** The main stakeholders in addressing the research question, the level of their interests and their impact on the functioning of the ETS are characterized. The implementation of the EU ETS significantly affects the dry cargo maritime transport and chartering market in financial, operational and strategic aspects. In financial terms, the costs of purchasing EU allowances (EUA) and incorporating CO₂ emissions costs into freight rates impose a significant burden on shipping companies, leading to increased freight rates and operating costs.

Key words: European Union Emissions Trading Scheme, Energy Efficiency Index for Existing Ships, Carbon Intensity Indicator.

Вступ. Морська галузь перебуває на порозі значних змін у зв'язку з новими правилами, запровадженими Міжнародною морською організацією (ІМО). У липні 2023 року ІМО оприлюднила оновлені стратегії та цілі, що ознаменувало серйозні

зміни у скороченні викидів парникових газів (Greenhouse Gas, GHG) у морському секторі. Ці нові директиви спрямовані на комплексні цілі скорочення викидів парникових газів, на відміну від попереднього фокусу виключно на інтенсивності викидів вуглекислого газу (CO₂). Однак вони все ще підкреслюють важливість існуючих інструментів, таких як Індекс енергоефективності існуючих суден (Efficiency Existing Ship Index, EEXI) та Індикатор інтенсивності викидів вуглецю (Carbon Intensity Indicator, CII) для постійного вдосконалення скорочення викидів [1; 2].

Ці зміни є стратегічними, оскільки Комітет із захисту морського середовища (Maritime Environment Protection Committee, MEPC 80) ІМО закінчив ретельну оцінку впливу, котра мала на меті проаналізувати економічні наслідки середньострокових політичних заходів. Отримані результати закладають основу для майбутнього впровадження нормативних документів, включаючи прийняття цільового стандарту суднового палива, який диктує поетапне скорочення його використання та механізм ціноутворення на вуглець. Ці заходи планується впровадити у 2025 році та застосовувати з 2027 року, дотримуючись амбітних термінів, встановлених ІМО [3–5].

В основі переглянутої Стратегії ІМО щодо викидів парникових газів 2023 року лежить тверде зобов'язання досягти суттєвого скорочення таких викидів від міжнародного судноплавства. Стратегія передбачає чесний і справедливий перехід, встановлюючи орієнтири для промисловості, спрямовані на скорочення викидів парникових газів на 30 % до 2030 року з ескалацією до скорочення на 80 % до 2040 року, з кінцевою метою досягнення чистих нульових викидів якомога ближче до 2050 року. Початкова стратегія викидів парникових газів, викладена у 2018 році, мала на меті скоротити середню інтенсивність викидів вуглецю в галузі міжнародного судноплавства щонайменше на 40 % до 2030 року порівняно з рівнями 2008 року. Відповідно до цієї мети 1 січня 2023 року було введено в дію правила EEXI та CII, спрямовані на визначення, кількісну оцінку та зменшення інтенсивності викидів CO₂ існуючих суден [1; 2].

Незважаючи на збільшення глобальної морської торгівлі у вимірі тонно-миль майже на 40 % з 2008 року, викиди від міжнародного судноплавства, які досягли піку в 1 мільярд тон у 2008 році, скоротилися приблизно до 850 мільйонів тон у 2022 році. Незважаючи на прогрес у покращенні вуглецевої інтенсивності судноплавства, впровадження правил EEXI та CII означає еру, яка вимагає значних покращень енергоефективності морських транспортних суден, що перебувають в експлуатації [1; 2].

Постановка проблеми. Нещодавні нормативні зміни, запроваджені ІМО, спричинили значні потрясіння у морській галузі, особливо в секторі суховантажних перевезень. Суднові брокерські фірми, наприклад Genconis LLC та інші, опиняються в стані очікування та занепокоєння, розмірковуючи про наслідки цих змін для їхньої повсякденної діяльності та ширше – ринку сухих насипних вантажів. З появою оновлень ІМО 2023, спрямованих на скорочення викидів GHG, морський ландшафт зазнає глибокої реформації. Genconis LLC чітко розуміє необхідність завчасного усвідомлення та підготовки до невідворотних змін. Безпрецедентний характер і потенційний вплив цих правил на повсякденну діяльність і ринок сухих вантажів спонукали компанію розпочати це дослідження для

здобуття відповідних знань та стратегічного передбачення, щоб уміло орієнтуватися в мовах, що змінюються.

Запровадження змін ІМО 2023 року, спрямованих на скорочення викидів парникових газів, викликало підвищене очікування та занепокоєння серед Genconіs LLC та інших брокерських компаній. Ці майбутні зміни в правилах свідчать про значну трансформацію в морській галузі, що змушує судових брокерів мати своє бачення перспектив та проводити завчасну підготовку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вплив роботи морських транспортних суден на навколишнє середовище через викиди шкідливих речовин завжди був у фокусі багатьох наукових досліджень. Пошук ефективних методів вирішення проблеми в системі менеджменту судноплавства у попередні часи представлений, наприклад, у роботах [6–8]. Автори визначають сукупність факторів, що зумовлюють процес раціоналізації використання палива морськими суднами, та поділяють їх на конструктивні, технологічні та організаційно-економічні, причому основою раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів визнають розробку та впровадження енергозберігаючих та природоохоронних технологій і вдосконалення управління використанням палива [8].

Формулювання цілей статті. Стаття має на меті дослідити вплив нещодавніх нормативних актів на учасників ринку морських транспортних перевезень та те, як ці зміни згодом вплинуть на брокерські компанії, що працюють у суховантажному сегменті.

Основне завдання – дослідити, як опосередковано вплине впровадження оновлених ІМО 2023 року щодо скорочення викидів GHG на діяльність судових брокерських компаній через їхні відносини з власниками та операторами суховантажних суден.

Вирішення поставленого завдання потребує зосередження уваги на таких питаннях:-

1. Які конкретні регуляторні зміни були внесені оновленнями ІМО 2023 щодо скорочення викидів GHG, і чим вони відрізняються від попередніх нормативних актів?
2. Яку роль відіграють ЕЕХІ та СІІ у контексті скорочення викидів GHG?
3. Які очікувані економічні наслідки оновлених правил для власників і операторів сухих вантажів, зокрема, з точки зору щоденних операцій, витрат і прибутковості?
4. Як прийняття нових правил може вплинути на конкурентоспроможність і ринкове позиціонування судових брокерських компаній у секторі перевезення сухих навалочних вантажів, враховуючи їхню взаємодію з власниками та операторами сухих вантажів?

Крім того, опосередкований вплив цих правил на судові брокерські компанії, які працюють із власниками та операторами суховантажних суден, вимагає більш ретельного вивчення потенційних ризиків, стратегічних міркувань і порад, необхідних для навігації в нормативному середовищі, що розвивається.

Виклад основного матеріалу. Заснована в 2005 році, EU ETS є першою у світі міжнародною системою торгівлі викидами. Вона пройшла чотири фази, кожна з яких відповідає викликам і сприяє розширенню її сфери впливу. Четверта фаза, яка розпочалася у 2021 році, є особливою та заслуговує на увагу, оскільки вона

інтегрує судноплавство в нормативну базу, узгоджуючи її з амбіціями ЕУ щодо кліматичних цілей до 2030 року [1].

Морський транспорт є значним джерелом викидів парникових газів, що становить приблизно 3–4 % загальних викидів CO₂ в ЄС у 2021 році. У всьому світі викиди від судноплавства становили 2,9 % антропогенних викидів у 2018 році, досягнувши 1076 мільйонів тон CO₂. Прогнозується, що до 2050 року ця цифра зросте на 130 % від рівня 2008 року, створюючи значну загрозу для цілей Паризької кліматичної угоди [2].

Щоб вирішити цю проблему, ІМО зробила важливий крок у липні 2023 року, зобов'язавшись досягти нових цілей скорочення викидів парникових газів і плануючи вжити відповідних заходів до 2025 року. Одночасно Європейський Союз розширив свою систему торгівлі викидами, включивши в неї викиди CO₂ від суден, що заходять у європейські порти [1; 2].

Ретельну оцінку впливу викидів та розробку стратегії щодо протидії покладено на Комітет із захисту морського середовища ІМО (МЕРС 80). Згідно з МЕРС 80 (2023), нові правила вплинуть на суховантажні судна через схему торгівлі викидами (ETS) й індикатор інтенсивності вуглецю (СІІ). Ці правила охоплюють три запропоновані статті, спеціально розроблені для рейсових чартерів та тайм-чартерів щодо ETS та СІІ, та призначені для регулювання заходів відповідності. Пункт ETS окреслює угоду між власниками та фрахтувальниками, зосереджуючись на дозволах на викиди згідно зі схемою викидів. Він включає протоколи співпраці, моніторингу та звітування про викиди парникових газів, процедури передачі дозволів на викиди та положення щодо компенсації дозволів протягом періодів, коли судна «випадають» з тайм-чартеру (off-hire) [9–13].

З іншого боку, пункт СІІ визнає зобов'язання судна дотримуватися правил Міжнародної конвенції про запобігання забрудненню із суден MARPOL щодо інтенсивності викидів вуглецю починаючи з 1 січня 2023 року. Він спрямовує співпрацю між власниками та фрахтувальниками для моніторингу підвищення енергоефективності, зобов'язує власників надавати фрахтувальникам значення СІІ судна за попередній рік та деталі споживання палива, окреслює зобов'язання щодо відповідності для обох сторін та передбачає обговорення стратегій відповідності у разі внесення нормативних поправок протягом терміну дії чартеру. Ці положення окреслюють спільну відповідальність, співпрацю та механізми відповідності між Власниками та Фрахтувальниками. Вони розроблені спеціально для забезпечення відповідності вимогам щодо викидів парникових газів і дотримання стандартів енергоефективності в секторі сухих навалочних перевезень.

Охарактеризуємо основні зацікавлені сторони (рис.) у вирішенні дослідницького питання, рівень їхніх інтересів та впливу на функціонування ETS.

ІМО діє як глобальний регулюючий орган, який встановлює стандарти та правила для морської галузі. Нещодавні оновлення та стратегії ІМО щодо скорочення викидів GHG суттєво впливають на майбутні напрями та політику галузі. Комітет із захисту морського середовища (МЕРС 80) ІМО відповідальний за розгляд питань, пов'язаних із запобіганням забрудненню із суден і контролем за ним. МЕРС 80 проводить оцінку впливу та відіграє ключову роль у формуванні нормативних актів, впливаючи на відповідність вимогам зацікавлених сторін та їхню діяльність.

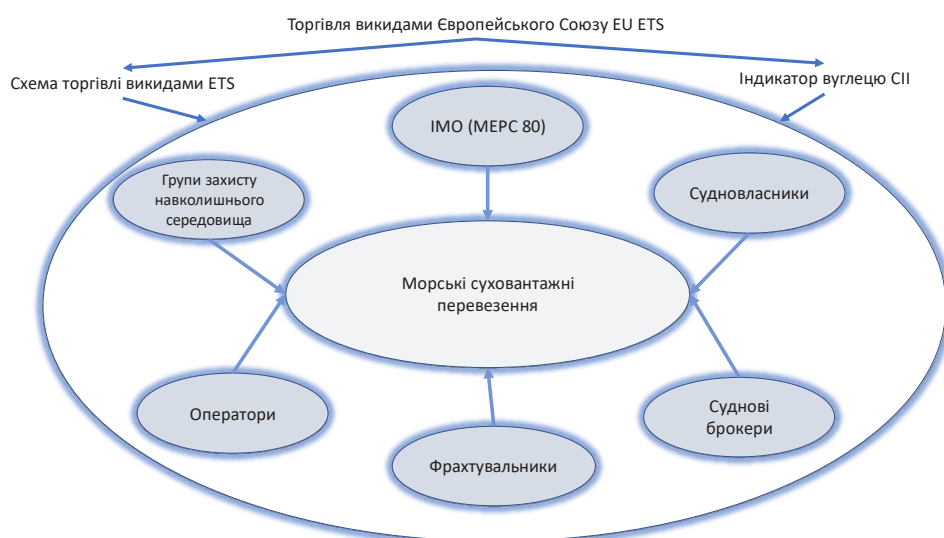


Рис. Сторони, зацікавлені в функціонуванні ETS

Групи захисту навколишнього середовища та промисловості – організації, що виступають за сталу та екологічно чисту практику в морському секторі. Вони уважно стежать за політикою та часто впливають на неї, прагнучі забезпечити відповідність нормативних актів екологічним цілям.

Судновласники та оператори володіють судами або експлуатують їх у морському секторі. Оскільки на них безпосередньо впливають нормативні зміни, вони прагнуть адаптувати свій флот і діяльність до нових стратегій скорочення викидів GHG, зокрема впровадження таких заходів, як індекс EEXI та СІІ.

Судновласники мають високий інтерес до розуміння фінансових наслідків та операційних коригувань, необхідного для EU ETS дотримання законодавства, а також потенційних змін у моделях торгівлі. Вони володіють високою здатністю приймати вагомі рішення в плануванні маршрутів і роботі суден, суттєво впливаючи на виклики промисловості до нормативних змін. Цей вплив походить від їхнього контролю над витратами судна та їхньою здатністю приймати стратегічні рішення щодо роботи флоту. Їхній інтерес і вплив безпосередньо пов'язані з проблемами, згаданими раніше, такими як значні витрати на відповідність вимогам, складність звітності про викиди та необхідність інтегрувати витрати CO₂ у фрахтові договори [14; 15]. Судновласники повинні орієнтуватися в цих нормативних вимогах, збалансовуючи операційну ефективність і фінансову життєздатність, роблячи свою роль ключовою в адаптації галузі до EU ETS.

Оператори суден керують комерційними та експлуатаційними аспектами судна, включаючи фрахтування, обробку вантажу та забезпечення дотримання нормативних вимог. Вони можуть діяти як посередники на ринку вантажних перевезень, фрахтуючи судна для перевезення вантажів або шукаючи роботу для суден свого флоту. Оператори віддають пріоритет оптимізації ефективності роботи суден і підтримці оперативної ефективності в рамках нормативної бази EU ETS. Вони мають помірний вплив на продуктивність судна, рішення щодо технічного обслуговування та стратегії

відповідності, що є критично важливим для ефективності роботи та дотримання нормативних вимог. Оператори відіграють ключову роль у впровадженні практичних заходів щодо скорочення викидів і управління витратами на відповідність.

Фрахтувальники та вантажовласники – суб'єкти, які беруть участь у фрахтуванні суден або володіють вантажами, що транспортуються морськими шляхами. На них впливають зміни в нормативних актах і динаміка ринку, що позначається на стратегії вибору суден і транспортування вантажів. Після дослідження ринку та структур судноплавних компаній та всього відповідного до зацікавлених сторін було з'ясовано, що трейдери (торгові компанії – посередники між продавцями та покупцями вантажів) не мають відношення до EU ETS. Для цього та стосовно доставки після продажу / купівлі вантажу у них є зацікавлена сторона, якою і є Фрахтувальник, що представляє вантажовласника у фрахтових компаніях. Фрахтувальники, які представлені в чартер-партіях з боку власника вантажу, мають великий інтерес до EU ETS через її прямий вплив на практику фрахтування і структури витрат. Вони мають помірний вплив, оскільки відіграють суттєву роль у переговорах фрахтової угоди, включаючи обговорення витрат, пов'язаних із EU ETS. Їхні рішення впливають на те, які судна зафрахтовані та на яких умовах, що робить їхню роль вирішальною щодо узгодження операційної стратегії з нормативними вимогами.

Суднові брокерські компанії, такі як Genconis LLC, безпосередньо беруть участь у фрахтуванні, брокерській діяльності, консультуванні та технічних аспектах морських операцій. На ці компанії серйозно вплинули нормативні зміни, і вони прагнуть зрозуміти, як ці зміни позначитимуться на їхній щоденній діяльності і позиціонуванні на ринку. Брокери виступають посередниками, уможливаючи угоди між судовласниками та фрахтувальниками, використовуючи свої широкі знання про умови глобальної торгівлі, товарні ціни та рух товарів. Балтійська біржа в Лондоні є ключовим центром для брокерських компаній, що пропонує платформу, яка полегшує ефективний пошук вантажу для суден [15]. Суднові брокери дуже зацікавлені в розумінні тонкощів EU ETS, щоб надати цінні вказівки клієнтам і оптимізувати фрахтові угоди. Попри те, що вони мають помірний вплив у сприянні переговорам і пропозиціям, позитивний результат залежить від їхньої здатності посередничати між зацікавленими сторонами й адаптуватися до динаміки ринку. Така роль є значною у забезпеченні складання договору, відображаючи нову структуру витрат, встановлену EU ETS.

Спираючись на власний практичний досвід, інформацію стейкхолдерів, відвідані вебінари, нормативні та наукові першоджерела, ми узагальнили результати проведеного аналізу інтересу та рівня впливу зацікавлених сторін у таблиці.

Таблиця

Інтерес та рівень впливу на функціонування EU ETS

Зацікавлена сторона	Інтерес	Рівень впливу
ІМО (МЕРС 80)	Високий	Високий
Судновласники		Високий
Оператори		Помірний
Фрахтувальники		Помірний
Суднові брокери		Помірний

Висновки. Безпосередні виклики, з якими стикається галузь морських суховантажних перевезень щодо відповідності вимогам правил ІМО 2023 року відносно EU ETS, є багатогранними, що включає значні адміністративні, фінансові та операційні труднощі. По-перше, точна звітність про викиди вимагає надійності системи моніторингу та звітності про викиди, що становить значний адміністративний тягар. Тонкощі цих процесів збільшують ризик помилок, які потенційно призведуть до фінансових санкцій.

Впровадження EU ETS значно впливає на ринок морських суховантажних перевезень і фрахтування у фінансових, операційних і стратегічних аспектах. У фінансовому плані витрати на придбання квот ЄС (EUA) та врахування витрат на викиди CO₂ у фрахтових ставках накладає значний тягар на судноплавні компанії, що призводить до підвищення фрахтових ставок та експлуатаційних витрат. Необхідна оперативність точного звітування про викиди, оптимізація маршрутів та інвестиції у технології зменшення викидів у повсякденній практиці, що вимагає більш ефективних та економічно життєздатних суден. Стратегічно галузь має адаптуватися до дворівневого ринку, де належні та ефективні судна конкурентоспроможні, що вимагає комплексних стратегій декарбонізації та гнучкості операційних коригувань. Загалом, EU ETS спонукає галузь морських суховантажних перевезень до більшої ефективності, технологічних інновацій та стратегічної адаптивності, фундаментально змінюючи динаміку ринку та конкурентний ландшафт.

ЛІТЕРАТУРА

1. European Commission. (n. d.). Reducing emissions in the shipping sector. European Union. Retrieved from https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector_en
2. European Commission. (n. d.). FAQ: Maritime Transport & EU Emissions Trading System (ETS). Retrieved from https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector/faq-maritime-transport-eu-emissions-trading-system-ets_en
3. RESOLUTION MEPC.377(80) (adopted on 7 July 2023). 2023 IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS. 17 p. Retrieved from [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/PressBriefings/Documents/Resolution%20MEPC.377\(80\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/PressBriefings/Documents/Resolution%20MEPC.377(80).pdf)
4. RESOLUTION MEPC.389(81) (adopted on 22 March 2024). AMENDMENTS TO THE 2022 GUIDELINES FOR ADMINISTRATION VERIFICATION OF SHIP FUEL OIL CONSUMPTION DATA AND OPERATIONAL CARBON INTENSITY (RESOLUTION MEPC.348(78)). 3 p. Retrieved from [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.389\(81\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.389(81).pdf)
5. RESOLUTION MEPC.395(82) (adopted on 4 October 2024). 2024 GUIDELINES FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP). 2024 GUIDELINES FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP). 37 p. Retrieved from [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/MEPC.395\(82\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/MEPC.395(82).pdf)

6. Лапкіна І.О., Главатських В.І. Економічний аспект в управлінні енергетичними ресурсами суден. *VIA ECONOMICA*. 2024. № 4. С. 119–125. doi: 10.32782/2786-8559/2024-4-1
7. Glavatskykh V., Lapkin A., Dmitrieva L., Khodikova I., Golovin A. Ships' energy efficiency management: organizational and economic aspect. International Conference on Sustainable Transport System and Maritime Logistics. Batumi Navigation Teaching University, MATEC Web of Conferences 339. 2021. doi: 10.1051/mateconf/202133901020
8. Лапкіна І.О., Главатських В.І. Управління експлуатаційними витратами суден та виконання правил МАРПОЛ : матеріали II Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ и ТЕ Одеського національного морського університету МРР&О-2020. Одеса, 2020. С. 376–381.
9. BIMCO. ETS – Emission Scheme Freight Clause for Voyage Charter Parties 2023. Retrieved from <https://www.bimco.org/contracts-and-clauses/bimco-clauses/current/ets-emission-scheme-freight-clause-for-voyage-charter-parties>
10. BIMCO. ETS – Emission Scheme Surcharge Clause for Voyage Charter Parties 2023. Retrieved from <https://www.bimco.org/contracts-and-clauses/bimco-clauses/current/ets-emission-scheme-surcharge-clause-for-voyage-charter-parties>
11. BIMCO. ETS – Emission Trading Scheme Allowances Clause for Time Charter Parties 2022. Retrieved from https://www.bimco.org/contracts-and-clauses/bimco-clauses/current/etsa_clause
12. BIMCO. ETS – Emission Scheme Transfer of Allowances Clause for Voyage Charter Parties 2023. Retrieved from <https://www.bimco.org/contracts-and-clauses/bimco-clauses/current/ets-emission-scheme-transfer-of-allowances-clause-for-voyage-charter-parties>
13. BIMCO. ETS – Shipman Emission Trading Scheme Allowances Clause 2023. Retrieved from <https://www.bimco.org/contracts-and-clauses/bimco-clauses/current/ets-shipman-allowances-clause>
14. Hesse, F. EU ETS is live: What's the situation? 2024, February 26. Retrieved from EU ETS is live: What's the situation? – ZERO44
15. Hathi, S. P., Hathi, B. Ship arrest in India and admiralty laws of India. Brus Chambers, Advocates & Solicitors. 2024. Retrieved from <https://admiraltypractice.com/chapters/NS15.htm>

REFERENCES

1. European Commission. (n. d.). Reducing emissions in the shipping sector. European Union. Retrieved from https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector_en
2. European Commission. (n. d.). FAQ: Maritime Transport & EU Emissions Trading System (ETS). Retrieved from https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector/faq-maritime-transport-eu-emissions-trading-system-ets_en
3. (2023). RESOLUTION MEPC.377(80) (adopted on 7 July 2023). 2023 IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS. 17 p. Retrieved from [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/PressBriefings/Documents/Resolution%20MEPC.377\(80\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/PressBriefings/Documents/Resolution%20MEPC.377(80).pdf)

4. (2024). RESOLUTION MEPC.389(81) (adopted on 22 March 2024). AMENDMENTS TO THE 2022 GUIDELINES FOR ADMINISTRATION VERIFICATION OF SHIP FUEL OIL CONSUMPTION DATA AND OPERATIONAL CARBON INTENSITY (RESOLUTION MEPC.348(78)). 3 p. Retrieved from [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.389\(81\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.389(81).pdf)
5. (2024). RESOLUTION MEPC.395(82) (adopted on 4 October 2024). 2024 GUIDELINES FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP). 2024 GUIDELINES FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP). 37 p. Retrieved from [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/MEPC.395\(82\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/MEPC.395(82).pdf)
6. Lapkina I.O., Glavatskyh V.I. (2024). Economic aspect in the management of energy resources of ships [Ekonomichnyi aspekt v upravlinni enerhetychnymy resursamy suden]. VIA ECONOMICA, 4, 119–125. doi: 10.32782/2786-8559/2024-4-1
7. Glavatskykh V., Lapkin A., Dmitrieva L., Khodikova I., Golovin A. (2021). Ships' energy efficiency management: organizational and economic aspect. International Conference on Sustainable Transport System and Maritime Logistics. Batumi Navigation Teaching University, MATEC Web of Conferences 339. doi: 10.1051/mateconf/202133901020
8. Lapkina I.O., Glavatskyh V.I. (2020). Management of ship operating costs and implementation of MARPOL rules [Upravlinnia ekspluatatsiinymy vytratamy suden ta vykonannya pravyl MARPOL]. Materials of the II International Scientific and Practical Maritime Conference of the Department of SEU and TE of the Odessa National Maritime University MPP&O-2020, Odesa, 376–381. Odesa: ONMU
9. BIMCO. (2023). ETS – Emission Scheme Freight Clause for Voyage Charter Parties. Retrieved from <https://www.bimco.org/contracts-and-clauses/bimco-clauses/current/ets-emission-scheme-freight-clause-for-voyage-charter-parties>
10. BIMCO. (2023). ETS – Emission Scheme Surcharge Clause for Voyage Charter Parties. Retrieved from <https://www.bimco.org/contracts-and-clauses/bimco-clauses/current/ets-emission-scheme-surcharge-clause-for-voyage-charter-parties>
11. BIMCO. (2022). ETS – Emission Trading Scheme Allowances Clause for Time Charter Parties. Retrieved from https://www.bimco.org/contracts-and-clauses/bimco-clauses/current/etsa_clause
12. BIMCO. (2023). ETS – Emission Scheme Transfer of Allowances Clause for Voyage Charter Parties. Retrieved from <https://www.bimco.org/contracts-and-clauses/bimco-clauses/current/ets-emission-scheme-transfer-of-allowances-clause-for-voyage-charter-parties>
13. BIMCO. (2023). ETS – Shipman Emission Trading Scheme Allowances Clause. Retrieved from <https://www.bimco.org/contracts-and-clauses/bimco-clauses/current/ets-shipman-allowances-clause>
14. Hesse, F. (2024, February 26). EU ETS is live: What's the situation? Retrieved from EU ETS is live: What's the situation? – ZERO44
15. Hathi, S. P., Hathi, B. (2024). Ship arrest in India and admiralty laws of India. Brus Chambers, Advocates & Solicitors. Retrieved from <https://admiraltypractice.com/chapters/NS15.htm>

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.869.888

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2025.2-25.03>

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ КАРКАСА КОНТЕЙНЕРА УДОСКОНАЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПРИ ВАНТАЖНО-РОЗВАНТАЖУВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЯХ

А.О. Ловська¹, М.В. Павлюченков², А.О. Мурад'ян³, О.В. Демидюков⁴

¹доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції,
Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-8604-1764

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Теоретична і будівельна механіка»,
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова,
Харків, Україна,
доцент кафедри будівельних конструкцій,
Сумський національний аграрний університет, Суми, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-8168-7224

³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри
«Експлуатація портів і технологія вантажних робіт»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6488-6627>

⁴аспірант кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-4791-3830

Анотація

Вступ. Для підвищення об'ємів перевезень вантажів у міжнародному сполученні дістали поширення контейнерні перевезення. Це зумовлено можливістю перевезень контейнерів майже всіма видами транспорту, що значно пришвидшує транспортування вантажів від відправника до отримувача. Разом із цим у процесі експлуатації має місце пошкодження контейнерів, яке зумовлює необхідність здійснення позапланових видів їх ремонтів, а відповідно, і додаткових витрат на утримання в експлуатації. **Мета.** Дослідження міцності каркаса контейнера удосконаленої конструкції при вантажно-розвантажувальних операціях. **Результати.** Для забезпечення збереження контейнерів в експлуатації запропоновано удосконалення конструкції їх каркаса впровадженням розкосів та горизонтальних поясів. З метою визначення внутрішніх силових факторів, які виникають у каркасі контейнера при його підйомі за верхні фітинги проведено розрахунок у ПК «Ліра – САПР». Дослідження проведено на прикладі універсального контейнера типорозміру ІСС. При цьому каркас контейнера розглянуто у вигляді стрижневої конструкції, яка закріплена за верхні фітинги та сприймає вертикальне навантаження, зумовлене власною вагою та вагою вантажу. За

отриманими значеннями силових факторів визначено профіль виконання розкосів та горизонтальних поясів каркасу контейнера. З урахуванням обраного профілю виконання розкосів та горизонтальних поясів побудовано просторову модель каркаса та проведено його розрахунок на міцність. При цьому застосовано метод скінчених елементів, який реалізовано в *SolidWorks Simulation*. Встановлено, що запропоноване удосконалення є доцільним. При цьому стає можливим знизити максимальні напруження в каркасі контейнера на 7% порівняно з типовою конструкцією. **Висновки.** Результати проведених досліджень сприятимуть створенню рекомендацій щодо проєктування сучасних конструкцій контейнерів із покращеними техніко-економічними та експлуатаційними характеристиками. Це, своєю чергою, дозволить підвищити ефективність експлуатації контейнерних перевезень, у тому числі в міжнародному сполученні.

Ключові слова: каркас контейнера, удосконалення конструкції, навантаженість каркаса, міцність каркаса, вантажно-розвантажувальні операції.

RESEARCH ON THE STRENGTH OF THE CONTAINER FRAME OF AN IMPROVED DESIGN DURING LOADING AND UNLOADING OPERATIONS

A.O. Lovska¹, M.V. Pavliuchenkov², A.O. Muradian³, O.V. Demydiakov⁴

¹Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Wagon Engineering and Product Quality,
Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-8604-1764

²PhD, Associate Professor, Associate Professor, Department of Theoretical
and Structural Mechanics,
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine,
Associate Professor of the Department of Building Constructions
Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-8168-7224

³PhD, Associate Professor
Associate Professor of Department of Port Operation and Cargo Handling Technology,
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6488-6627>

⁴Graduate student
Department of port operation and cargo handling technology,
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-4791-3830

Summary

Introduction. To increase the volume of cargo transportation in international traffic, container transportation has become widespread. This is due to the possibility of transporting containers by almost all modes of transport, which significantly speeds up the transportation of goods from the sender to the recipient. At the same time, containers are damaged during operation, which necessitates the implementation of unscheduled types of their repairs, and, accordingly, additional costs for maintenance in operation. **Purpose.** Research into the strength of a container frame of improved design during loading and unloading operations. **Results.** To ensure the safety of containers in operation, it is proposed to improve the design of their frame by introducing braces and horizontal belts. In order to determine the internal force factors that arise in the container frame when

*it is lifted by the upper fittings, a calculation was performed in the PC "Lira – SAPR". The study was conducted on the example of a universal container of standard size 1 CC. In this case, the container frame was considered as a rod structure, which is fixed to the upper fittings and perceives the vertical load caused by its own weight and the weight of the cargo. Based on the obtained values of the force factors, the profile of the braces and horizontal belts of the container frame was determined. Taking into account the selected profile of the braces and horizontal belts, a spatial model of the frame was built and its strength was calculated. In this case, the finite element method, which is implemented in SolidWorks Simulation, was applied. It was found that the proposed improvement is expedient. This makes it possible to reduce the maximum stresses in the container frame by 7% compared to a typical design. **Conclusions.** The results of the research will contribute to the creation of recommendations for the design of modern container structures with improved technical, economic and operational characteristics. This, in turn, will allow to increase the efficiency of container transportation, including in international traffic.*

Key words: container frame, design improvement, frame loading, frame strength, loading and unloading operations.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Підвищення ефективності експлуатації вантажоперевезень у міжнародному сполученні є одним із можливих напрямів розвитку економіки європейських країн. Досягти цього можливо розвитком контейнерних перевезень [1; 2]. Перевезення вантажів у контейнерах є одним із найбільш перспективних видів перевезень. Це пояснюється відсутністю необхідності перевантаження вантажу, а також можливістю перевезень контейнера різними транспортними засобами. Разом із цим умовах експлуатації на конструкцію контейнера діють різні за величиною та природою походження силові фактори. Вони можуть сприяти пошкодженню контейнера. Одним із найбільш несприятливих серед них є пошкодження бокових стін. Унаслідок подібних пошкоджень виникає необхідність позапланових видів ремонту контейнерів, а відповідно, і додаткових витрат на їх утримання в експлуатації. Це зумовлює необхідність створення науково-технічних рішень, спрямованих на покращення міцності бокових стін контейнерів в експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання цієї проблеми, і виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми

Для покращення міцності контейнера авторами публікації [3] пропонується підвищення жорсткості його конструкції. Дане рішення обґрунтовано не тільки теоретичними розрахунками, а й експериментальними дослідженнями. Але таке впровадження не сприяє покращенню міцності бокових стін контейнера.

Покращення міцності контейнера можливо досягти і шляхом впровадження в його конструкцію нових матеріалів. Так, наприклад, у публікації [4] запропоновано використання вуглепластикових матеріалів у конструкції контейнера. Таке рішення, безумовно, має ряд переваг порівняно зі сталлю, яка є типовим матеріалом виготовлення контейнерів, але і вимагає відповідних капітальних вкладень на його впровадження.

Питання покращення міцності бокових стін контейнера висвітлено у публікації [5]. Авторами пропонується впровадження у якості їх обшивки сендвіч-панелей. При цьому покращення міцності бокових стін досягається зменшенням їх навантаженості. У статті наведено відповідне обґрунтування такого рішення.

У публікації [6] для покращення міцності контейнера також запропоновано впровадження в його конструкцію сендвіч-панелей. Дане удосконалення обґрунтовано на прикладі настилу підлоги контейнера.

Важливо сказати, що зазначені у публікаціях [5; 6] рішення є досить вартісним з точки зору їх впровадження, що стримує серійність виготовлення таких контейнерів.

Для покращення міцності контейнера в роботі [7] запропоновано у якості складових каркасу використання квадратних труб. Висвітлено особливості розрахунку на міцність такого каркаса та доведено доцільність запропонованого удосконалення. Разом із цим авторами не досліджувалися питання покращення міцності бокових стін контейнера.

У публікації [8] запропоновано нову конструкцію контейнера та наведено результати його розрахунку на міцність при основних режимах навантажень. Однак поза увагою авторів залишилися питання покращення міцності конструкції контейнера.

Проведений огляд літературних джерел доводить, що питання покращення міцності бокових стін контейнерів є актуальним та потребує подальшого дослідження.

Формулювання мети статті, постановка завдання. Метою статті є висвітлення результатів дослідження міцності каркаса контейнера удосконаленої конструкції при вантажно-розвантажувальних операціях. Досягнення зазначеної мети здійснено з урахуванням розв'язку таких завдань:

– дослідити силові фактори, що мають місце в каркасі контейнера при вантажно-розвантажувальних операціях;

– провести розрахунок на міцність каркаса контейнера.

Об'єктом дослідження є каркас контейнера типорозміру 1СС.

Предмет дослідження – навантаженість каркасу контейнера при вантажно-розвантажувальних операціях.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Для забезпечення міцності бокових стін контейнера в експлуатації пропонується посилення каркаса додатковими елементами – розкосами та горизонтальним поясом (рис. 1). Таке рішення сприяє збільшенню жорсткості каркаса, а відповідно, і покращенню його міцності не тільки при сприйнятті бокових навантажень, а і при вантажно-розвантажувальних операціях.

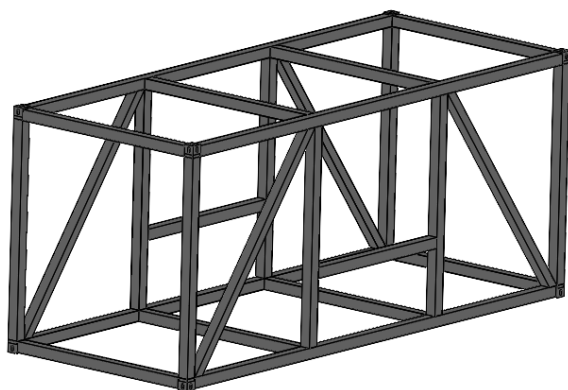


Рис. 1. Каркас контейнера

Для визначення внутрішніх силових факторів, які виникають у каркасі контейнера при його підйомі за верхні фітинги, проведено розрахунок у ПК «Ліра – САПР» [9]. Дослідження проведено на прикладі контейнера типорозміру 1СС. При цьому каркас контейнера розглянуто у вигляді стрижневої конструкції, яка закріплена за верхні фітинги та сприймає вертикальне навантаження, зумовлене власною вагою та вагою вантажу (рис. 2). Враховано, що вага бруто контейнера становить 240 кН. Вантаж розглянуто як умовний при використанні повної вантажопідйомності контейнера.

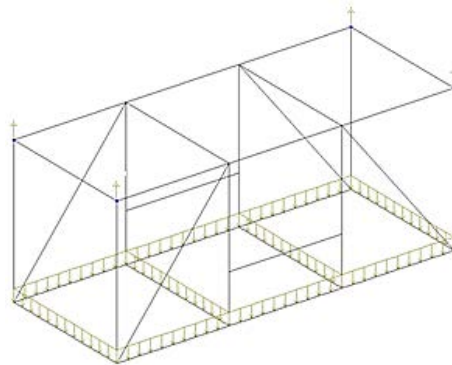


Рис. 2. Розрахункова схема каркаса контейнера

Із використанням опцій програмного комплексу отримано епюри внутрішніх силових факторів, що виникають у каркасі контейнера (рис. 3–5). Синім кольором показано від’ємне значення силових факторів, а помаранчевим – додатне. Максимальні повздовжні сили в каркасі контейнера мають місце у вертикальних стійках і дорівнюють 5,87 т (рис. 3). У розкосах значення повздовжніх сил має меншу величину і становить 4,44 т.

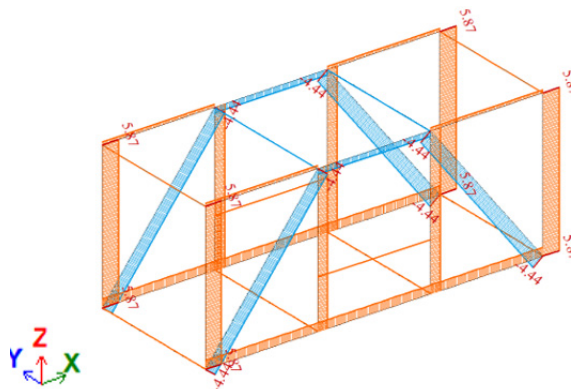


Рис. 3. Еюра повздовжніх сил (т)

На рис. 4 наведено епюру поперечних сил, які виникають у каркасі. Ці сили розподілені за законом трикутника і мають знакозмінне значення. Максимальне значення поперечних сил дорівнює 1,34 т.

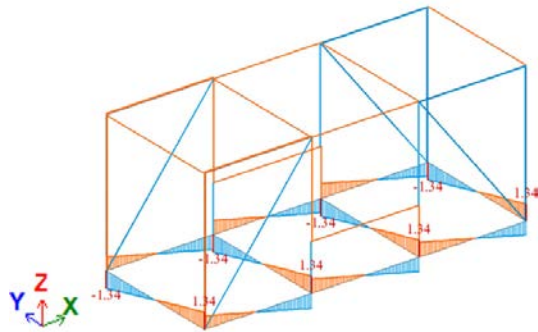


Рис. 4. Епюра поперечних сил (т)

У поперечних балках каркаса виникають згинальні моменти (рис. 5). Максимальне значення згинального моменту становить $0,523 \text{ т} \cdot \text{м}$ і виникає в середній частині поперечних балок.

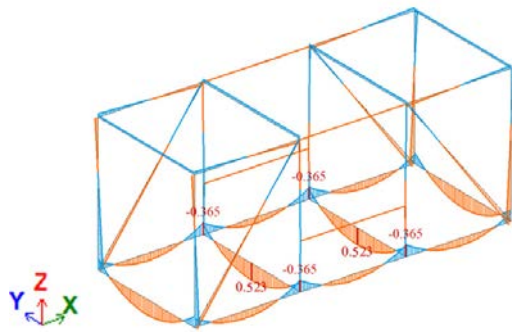


Рис. 5. Епюра згинальних моментів (т · м)

Максимальні деформації в каркасі також мають місце в поперечних балках рами (рис. 5). Це можна пояснити розрахунковою схемою каркаса (схемою закріплення та прикладення навантажень).

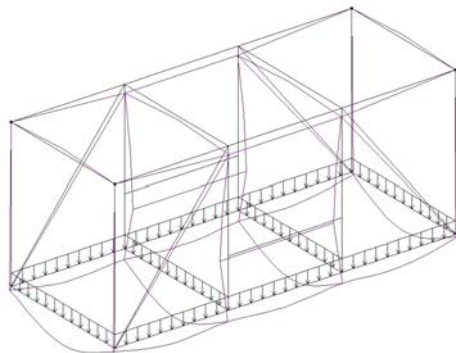


Рис. 6. Схема деформацій каркасу (масштаб збільшення 27:1)

За значенням максимальної повздожньої сили, яка виникає в розкосах, здійснено підбір їх профілю виконання. Для цього застосовано класичну формулу опору матеріалів:

$$\sigma = \frac{P}{A}, \quad (1)$$

де P – максимальне значення сили, яка діє в розкосі каркаса; A – площа поперечного перерізу розкосу.

Звідси, якщо прийняти припущення, що розрахункові напруження σ в розкосі дорівнюють допустимим напруженням матеріалу його виконання, можна записати:

$$A = \frac{P}{\sigma}. \quad (2)$$

Будемо вважати, що матеріалом розкосів є сталь марки 09Г2С. Тоді допустимі напруження становлять 210 МПа [10]. З урахуванням цього площа поперечного перерізу розкоса повинна становити не менше 207,4 см². За сортаментом профілів у якості профілю виконання розкосів каркаса пропонується використання квадратної труби 80x80 з товщиною стінки 11 мм та площею поперечного перерізу 27,21 см².

Для дослідження міцності каркаса з урахуванням обраного профілю виконання його розкосів проведено розрахунок на міцність за методом скінчених елементів. Його реалізацію здійснено у SolidWorks Simulation [11, 12]. Розрахункову схему каркаса наведено на рис. 6.

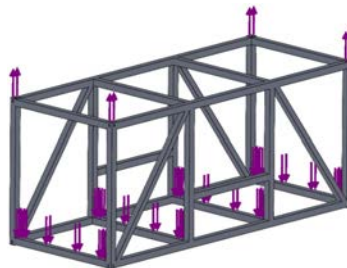


Рис. 7. Розрахункова схема каркаса

При складанні скінчено-елементної моделі використовувалися тетраедри [13; 14]. Скінчено-елементну модель наведено на рис. 7. Модель налічує 51069 елементів та 16551 вузлів.

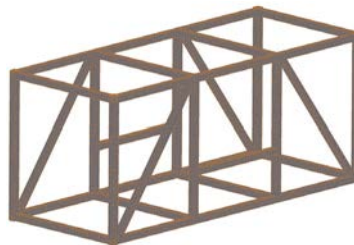


Рис. 8. Скінчено-елементна модель каркаса

Результати розрахунку наведено на рис. 8, 9. Максимальні напруження в каркасі виникають у вертикальних стійках і становлять 189,1 МПа (рис. 8), що нижче за допустимі [10].

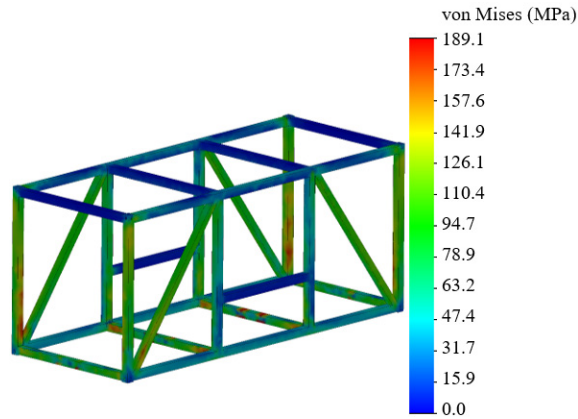


Рис. 9. Напружений стан каркаса

Максимальні переміщення в каркасі виникають у середніх частинах поперечних балок і становлять 3,39 мм (рис. 9).

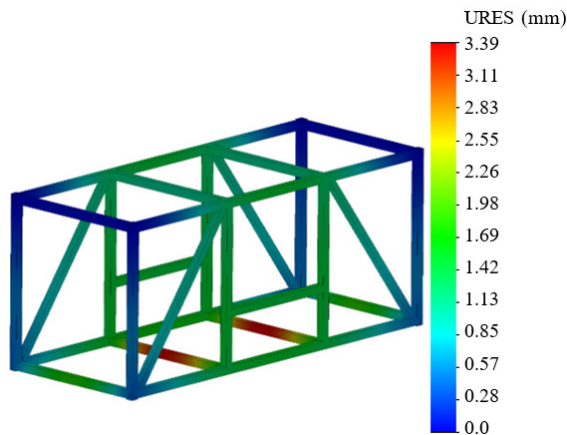


Рис. 10. Переміщення в вузлах каркаса

Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок, що запропоноване удосконалення є доцільним. При цьому стає можливим знизити максимальні напруження в каркасі на 7 % у порівняно з типовою конструкцією.

Висновки і перспектива подальшої роботи в цьому напрямі

1. Досліджено силові фактори, що мають місце в каркасі контейнера при вантажно-розвантажувальних операціях. Встановлено, що максимальні повздовжні сили в каркасі контейнера мають місце у вертикальних стійках і дорівнюють 5,87 т. У розкосах значення повздовжніх сил має меншу величину і становить 4,44 т. Максимальне значення поперечних сил у каркасі дорівнює 1,34 т. У поперечних

балках каркаса виникають згинальні моменти. Максимальне значення згинального моменту становить $0,523 \text{ т} \cdot \text{м}$ і виникає в середній частині поперечних балок.

За отриманими значеннями силових факторів визначено профіль виконання розкосів та горизонтальних поясів каркасу контейнера – квадратна труба 80×80 з товщиною стінки 11 мм та площею поперечного перерізу $27,21 \text{ см}^2$.

2. Проведено розрахунок на міцність каркаса контейнера. Максимальні напруження в каркасі виникають у вертикальних стійках і становлять 189,1 МПа, що нижче за допустимі. Максимальні переміщення в каркасі виникають у середніх частинах поперечних балок і становлять 3,39 мм.

Результати проведених досліджень сприятимуть створенню рекомендацій щодо проєктування сучасних конструкцій контейнерів із покращеними техніко-економічними та експлуатаційними характеристиками. Це, своєю чергою, дозволить підвищити ефективність експлуатації контейнерних перевезень, у тому числі в міжнародному сполученні. При цьому такі контейнери доцільно використовувати й у складі поїздів комбінованого транспорту, які перевозяться залізничними поромами. Адже кути крену залізничного порому зумовлюють додатковий тиск вантажу, що перевозиться, на стіни контейнера, а використання розкосів у каркасі бокових стін сприятиме покращенню їхньої міцності.

Подальшим розвитком даного дослідження є визначення міцності каркаса контейнера при інших експлуатаційних режимах навантажень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ловська А. О., Діжо Я., Рибін А. В., Рукавішников П. В. Особливості визначення показників міцності кузова напіввагона при перевезенні в ньому контейнерів. *Наукові вісті Дніпровського університету*. 2024. № 26. DOI: 10.33216/2222-3428-2024-26-9
2. Reidemeister O. H., Kalashnyk V. O., Shykunov O. A.. Modernization as a way to improve the use of universal cars. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2016. № 2 (62). DOI: 10.15802/stp2016/67334
3. Xiaoxiong Zha and Yang Zuo. Theoretical and experimental studies on in-plane stiffness of container structure with holes. *Advances in Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 8(6). P. 1–17. DOI: 10.1088/10.1177/1687814016651372
4. Turkay Yildiz. Design and Analysis of a Lightweight Composite Shipping Container Made of Carbon Fiber Laminates. *Logistics*. 2019. Vol 3. No. 18. DOI: 10.1088/10.3390/logistics3030018
5. Vatulia G. L., Lovska A. O., Krasnokutskyi Ye. S. Research into the transverse loading of the container with sandwich-panel walls when transported by rail. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254. 012140. DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012140
6. Lovska A., Stanovska I., Kyryllova V., Okorokov A., Vernigora R. Determining the vertical load on a container with a floor made of sandwich panels transported by a flat wagon. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. № 6/7 (132). P. 6–14. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.311324

7. Gerlici Ju., Lovska A., Pavliuchenkov M., Krachenko O. Peculiarities of designing the frame of a universal container made of rectangular pipes. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. 2024. Vol. 26, Issue 2. P. B72–B79. DOI: 10.26552/com.C.2024.016
8. Cheng K. J., Lees C. H., Peng C. C. Design and structural analysis of high payload C1 container. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2878. 012012. DOI: 10.1088/1742-6596/2878/1/012012
9. Барабаш М. С., Сорока М. М., Сур'янінов М. Г. Нелінійна будівельна механіка з ПК Ліра-Сапр. Одеса : Екологія, 2018. 248 с.
10. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамостійних). Київ, 2015. 250 с.
11. Пустюльга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. Інженерна графіка в SolidWorks : навчальний посібник. Луцьк : Вежа, 2018. 172 с.
12. Козяр М. М., Фещук Ю. В., Парфенюк О. В. Комп'ютерна графіка: SolidWorks : навчальний посібник. Херсон : Олді-плюс, 2018. 252 с.
13. Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Glib Vatulia, Mykhailo Pavliuchenkov, Oleksandr Kravchenko, Sebastian Solcansky. Situational adaptation of the open wagon body to container transportation. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13(15). 8605 p. DOI: 10.3390/app13158605
14. Philip Chie Hui Ling, Cher Siang Tan. Numerical Simulation of ISO Freight Container Using Finite Element Modelling. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2019. Vol 53. P. 463–469. DOI: 10.1007/978-3-030-32816-0_31

REFERENCES

1. Lovska A. O., Dizo Ya., Rybin A. V. & Rukavishnikov P. V. (2024). Peculiarities of determining the strength indicators of the semi-wagon body when transporting containers in it [Osoblyvosti vyznachennia pokaznykiv mitsnosti kuzova napivvahona pry transportuvanni v nomu konteineriv]. *Naukovi visti Dalivskoho universytetu*, 26. DOI: 10.33216/2222-3428-2024-26-9 [in Ukrainian].
2. O. H. Reidemeister, V. O. Kalashnyk & O. A. Shykunov. (2016). Modernization as a way to improve the use of universal cars. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, 2 (62). DOI: 10.15802/stp2016/67334
3. Xiaoxiong Zha and Yang Zuo. (2016). Theoretical and experimental studies on in-plane stiffness of container structure with holes. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(6). 1–17. DOI: 10.1088/10.1177/1687814016651372
4. Turkay Yildiz (2019). Design and Analysis of a Lightweight Composite Shipping Container Made of Carbon Fiber Laminates. *Logistics*. 3. 18. DOI: 10.1088/10.3390/logistics3030018
5. G. L. Vatulia, A. O. Lovska, Ye. S. Krasnokutskyi. (2023). Research into the transverse loading of the container with sandwich-panel walls when transported by rail. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 1254. 012140. DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012140

6. Alyona Lovska, Iraida Stanovska, Valeriia Kyrylova, Andrii Okorokov, Roman Vernigora. (2024). Determining the vertical load on a container with a floor made of sandwich panels transported by a flat wagon. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 6/7 (132). 6–14. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.311324
7. Gerlici Juraj, Lovska Alyona, Pavliuchenkov Mykhailo, Kravchenko Oleksandr. (2024). Peculiarities of designing the frame of a universal container made of rectangular pipes. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. 26. 2. B72–B79. DOI: 10.26552/com.C.2024.016
8. Cheng K. J., Lees C. H., Peng C. C. (2024). Design and structural analysis of high payload C1 container. *Journal of Physics: Conference Series*. 2878. 012012. DOI: 10.1088/1742-6596/2878/1/012012
9. Barabash, M. S., Soroka, M. M. & Suryaninov, M. G. (2018). Nonlinear structural mechanics with PC Lira-Sap. [Нелінійна будівельна механіка з ПК Ліра-Сап]. Odesa: Ecology, 248 p. [in Ukrainian].
10. DSTU 7598:2014. Freight wagons. General requirements for calculations and design of new and modernized 1520 mm gauge wagons (non-self-propelled) [Важонь вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проєктування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамокhidnykh)]. (2015) Kyiv. 2015. 250 p. [in Ukrainian].
11. Pustylga, S. I., Samostyan, V. R. & Klak, Y. V. (2018). Engineering graphics in SolidWorks: a tutorial. [Інженерна графіка в SolidWorks: навчальні посібник]. Lutsk: Tower, 172 p. [in Ukrainian].
12. Kozyar, M. M., Feshchuk, Yu. V. & Parfenyuk O. V. (2018). Computer graphics: SolidWorks: Study guide. [Комп'ютерна графіка: SolidWorks: Навчальні посібник]. Kherson: Oldi-plus, 252 p. [in Ukrainian].
13. Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Glib Vatulia, Mykhailo Pavliuchenkov, Oleksandr Kravchenko, Sebastian Solcansky. (2023). Situational adaptation of the open wagon body to container transportation. *Applied Sciences*. 13(15), 8605. DOI: 10.3390/app13158605
14. Philip Chie Hui Ling, Cher Siang Tan. (2019). Numerical Simulation of ISO Freight Container Using Finite Element Modelling. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 53, 463–469. DOI: 10.1007/978-3-030-32816-0_31

PROSPECTS FOR CREATING DIGITAL TWINS OF FREIGHT CARS

O.V. Fomin¹, O.V. Burlutskyi², T.V. Stoliarenko³, S.M. Leonov⁴

¹Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Cars and Carriage Facilities,
State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-2387-9946

²PhD (Engineering),
Associate Department of Mechanics and Machine Design,
Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-1902-5809

³ Postgraduate Student at the Department of Automation
and computer-integrated transport technologies,
State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0001-3515-1525

⁴ Postgraduate Student at the Department of Automation
and computer-integrated transport technologies,
State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0000-5003-3714

Summary

Introduction The global industry and transport are rapidly moving into the era of digitalisation, which is radically changing approaches to the production, operation and maintenance of railway transport. Ukraine, as part of the global market, is also actively implementing innovative solutions. Rail transport is the circulatory system of the Ukrainian economy and logistics, combining strategic, economic and social functions. **Relevance.** A digital twin is a virtual copy of a physical object, process or service that is constantly updated with data from the real world. In the case of a freight car, its digital twin may include detailed information about its technical condition, operating history, current location, load, and other important parameters. **The purpose of the study.** The purpose of this research is to study in depth the prospects for the creation and implementation of digital twins of freight cars in the railway transport industry of Ukraine. The relevance of the study is due to the need to increase the efficiency of rolling stock operation, optimise maintenance processes and predict possible malfunctions. **Results.** An approach to design based on a digital twin has been introduced, which will provide an end-to-end design workflow in a single information space regardless of the software systems used to calculate the components and systems of freight cars, and a block diagram of the operation of a digital twin of a freight car has been constructed. **Conclusions.** Modelling various operating scenarios on virtual copies allows optimising maintenance and repair modes. Scientifically based algorithms integrated into digital twins contribute to the early detection of potential malfunctions. Applied conclusions indicate the possibility of a significant reduction in maintenance and repair costs. The introduction of digital twins allows for optimised planning of repair work and reduced downtime for wagons.

Key words: transport, railway transport, wagons, digital twins, computer technology, artificial intelligence, transport technology.

**ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ
ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ**

О.В. Фомін¹, О.В. Бурлуцький², Т.В. Столяренко³, С.М. Леонов⁴

¹д. т. н., професор кафедри «Вагони та вагонне господарство»,
Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-2387-9946

²к. т. н., асистент, кафедри «Механіки і проектування машин»,
Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-1902-5809

³аспірант кафедри автоматизація та комп'ютерно-інтегровані транспортні технології,
Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна,
ORCID ID: 0009-0001-3515-1525

⁴аспірант кафедри автоматизація та комп'ютерно-інтегровані транспортні технології,
Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна,
ORCID ID: 0009-0000-5003-3714

Анотація

Вступ. Світова промисловість і транспорт стрімко переходять в еру цифровізації, що кардинально змінює підходи до виробництва, експлуатації та обслуговування залізничного транспорту. Україна, як частина глобального ринку, також активно впроваджує інноваційні рішення. Залізничний транспорт є кровоносною системою української економіки та логістики, поєднуючи стратегічні, економічні та соціальні функції. **Актуальність.** Цифровий двійник являє собою віртуальну копію фізичного об'єкта, процесу або послуги, яка постійно оновлюється даними з реального світу. Щодо вантажного вагона його цифровий двійник може включати детальну інформацію про його технічний стан, історію експлуатації, поточне місцезнаходження, навантаження та інші важливі параметри. **Мета.** Метою цього наукового дослідження є глибоке вивчення перспектив створення та впровадження цифрових двійників вантажних вагонів у галузі залізничного транспорту України. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності експлуатації рухомого складу, оптимізації процесів технічного обслуговування та прогнозування можливих несправностей. **Результати.** Впроваджено підхід до проектування на основі цифрового двійника, який забезпечить наскрізний робочий процес проектування в єдиному інформаційному просторі незалежно від програмних систем, які використовуються для розрахунків вузлів та систем вантажних вагонів, також побудована блок-схема роботи цифрового двійника вантажного вагона. **Висновки.** Моделювання різних сценаріїв експлуатації на віртуальних копіях дозволяє оптимізувати режими обслуговування та ремонту. Науково обґрунтовані алгоритми, інтегровані в цифрові двійники, сприяють ранньому виявленню потенційних несправностей. Прикладні висновки свідчать про можливість значного скорочення витрат на технічне обслуговування та ремонт. Впровадження цифрових двійників дозволяє оптимізувати планування ремонтних робіт та зменшити час простою вагонів..

Ключові слова: транспорт, залізничні перевезення, вагони, цифрові двійники, комп'ютерні технології., штучний інтелект, транспортні технології.

Introduction. Global industry and transport are rapidly moving into the era of digitalization, which is radically changing approaches to the production, operation, and maintenance of railway transport [1]. Ukraine, as part of the global market, is also actively implementing innovative solutions. Railway transport is the circulatory system of the Ukrainian economy and logistics, combining strategic, economic and social functions. The rapid development of information technologies has truly revolutionized approaches to the management of industrial enterprises, in particular in the field of railcar construction. Therefore, scientific research and development of digital technologies - the introduction of digital twins of railcars for load modeling and structural optimization are very relevant, taking into account strategic goal No. 8 of stimulating research and development in conditions of limited material resources, enabling the implementation of innovative projects in priority industries [2].

Topicality. A digital twin is a virtual copy of a physical object, process, or service that is constantly updated with real-world data. In the case of a freight car, its digital twin can include detailed information about its technical condition, operating history, current location, load, and other important parameters. Creating such digital representations opens up many opportunities for optimizing fleet management.

In addition, the digital twin can be used to optimize loading and unloading processes. Having accurate information about the load capacity and condition of each wagon, it is possible to plan the placement of goods more effectively, avoiding overloading and inefficient use of space. This leads to reduced cargo handling times and increased throughput of the railway infrastructure.

Thus, conducting research and practical work to determine the prospects for creating digital twins of freight cars is not only relevant, but also a strategically important task for the development of railway transport. The introduction of this innovative technology will help increase the competitiveness of the industry, reduce operating costs, improve transportation safety and ensure more efficient use of transport infrastructure. Further research and practical implementation of these technologies will open a new era in rail fleet management.

Analysis of information sources on the topic under study. The scientific study [3] considers the concept of composite digital twins on the Digital Twin as a Service platform. The authors explore the architecture and possibilities of creating flexible and adaptive digital twins by combining various components and services. The paper discusses the advantages of such an approach for modeling complex systems and processes. The concept of composite digital twins contributes to the creation of more effective and versatile tools for analyzing and optimizing complex engineering systems. The article is an important contribution to the development of digital twin technologies.

In [4], the authors analyze the key characteristics and functionalities of modern platforms for creating and managing digital twins. The paper also discusses the challenges and potential directions of development of this technology. The article is a valuable overview for understanding the current state and future development of digital twin platforms. The study contributes to a better understanding of the capabilities and limitations of existing solutions.

The authors of the publication [5] explore the advantages of using a distributed architecture to create more adaptive and specialized digital twins. The paper discusses

approaches to the integration and interaction of various distributed components of digital twins. The concept of distributed digital twins is promising for modeling complex and geographically distributed systems. The article is an important contribution to the development of flexible and scalable solutions based on digital twins.

The paper [6] describes the process of "grounding" digital twins. The author explores the need to verify and validate digital twin data with real data to ensure their accuracy and reliability. The paper is likely to discuss methodologies for comparing virtual models with physical objects and environments. The paper emphasizes the importance of integrating real data to increase the trust and effectiveness of digital twins, especially in urban research. The research contributes to the development of digital model validation methodologies.

The paper [7] explores the application of agent-based artificial intelligence to digital twins. The authors explore the possibilities of providing digital twins with autonomous agent properties for more intelligent behavior and decision-making. The paper is likely to present concepts and architectures for integrating agent-based AI with digital twins, as well as the potential benefits of such an approach. This research is an important step in the development of more complex and autonomous digital twins. The paper demonstrates the prospects for integrating AI to improve the functionality of digital twins.

A chapter in the book "Digital Twins" by Springer [8] published in 2025 is devoted to the challenges associated with the development and implementation of digital twins. The authors are likely to analyze various problems that arise at different stages of the digital twin life cycle, including data collection and processing, modeling, integration and security. The paper may address technical, organizational and economic aspects of these challenges. This chapter is important for understanding the obstacles to the widespread implementation of digital twins. The study contributes to the identification of key issues for further research and development.

The analysis of literary sources revealed a noticeable lack of research devoted directly to determining the prospects for creating digital twins of freight cars. Existing works mainly consider general aspects of the digital transformation of transport or individual technological solutions without reference to the specifics of the freight car fleet. The potential economic, operational and safety benefits of implementing such twins have not been sufficiently studied. There is also a lack of in-depth analysis of technical requirements, integration problems with existing systems and possible risks. Therefore, the issue of determining the prospects for creating digital twins of freight cars requires more detailed and targeted scientific research. This opens up significant opportunities for future scientific exploration in this important field.

Research methods. The research is based on a comprehensive analysis, including a systems approach to understanding the railcar as a complex interacting system. Modeling and simulation theory is used to develop virtual copies capable of reproducing the behavior of real objects. Big data collection and analysis methods are used to process information from sensors and other sources, which is the basis for building accurate models. Machine learning and artificial intelligence are used to predict the technical condition, optimize maintenance and manage resources. The Internet of Things provides real-time data collection necessary for continuous updating of digital twins. Decision theory is used to develop support tools based on information obtained from digital twins.

Object and subject of research. The object of the study is a comprehensive system that encompasses technologies, processes, and data related to the creation, deployment, and use of digital twins of freight cars at different stages of their life cycle.

The subject of the study is the set of potential benefits, risks, technological and organizational prerequisites, as well as economic and social consequences associated with the implementation of digital twins for freight cars.

Purpose and objectives of the study. The purpose of this scientific research is to deeply study the prospects of creating and implementing digital twins of freight cars in the railway transport sector of Ukraine. The relevance of the research is due to the need to increase the efficiency of rolling stock operation, optimize maintenance processes and predict possible malfunctions. The creation of digital twins opens up new opportunities for modeling the behavior of cars in different operating conditions, analyzing their technical condition in real time and making informed management decisions.

To achieve this goal, it is necessary to solve a number of key problems. The primary task is to analyze existing technologies and approaches to creating digital twins in the transport industry, in particular, in the field of railway transportation. The next step will be to determine the key parameters and characteristics of freight cars that need to be reflected in the digital twin to ensure its functionality and informativeness. It is important to explore the possibilities of integrating digital twins with existing railway transport management and monitoring systems.

Presentation of the main material. The emergence of the concept of digital twins is associated with the works of Prof. associated with the works of Prof. M. Grieves. The idea of creating a virtual space in which information is exchanged with the real world was proposed by M. Grieves in 2002 as part of a presentation at the University of Michigan for industry representatives [9]. This concept, designated as "ideal PLM" (Product Lifecycle Management).

Within the freight car industry, the greatest effect can be achieved by building a digital twin of the entire freight car fleet, which will be a set of digital twins of individual freight cars operated on the railway network. The development of a digital twin of the freight car fleet will allow for the creation of a digital wagon resource management system.

The general algorithm of operation of a digital twin of a freight car at all stages of the life cycle, in general, the actions of twins can be divided into two types: training and control (Fig. 1). This was developed for a freight car, taking into account the experience [10].

Distributed machine learning can be used for training (step 1). The local training models are then sent to the twin level for aggregation in the blockchain miner (steps 2 and 3). Model updates from the blockchain are sent to the local systems, where the local models are updated accordingly (steps 4 and 5).

This iterative learning process can occur either synchronously or asynchronously. In asynchronous mode, a device sends its local model only when connected to the miner, while in synchronous mode, devices must send their local models to the miner for global aggregation at a predetermined point in time.

Therefore, we must choose the aggregation method according to the connection conditions. On the other hand, there are some scenarios, such as unmanned locomotives, where devices can generate up to 4000 GB of data per day, and this must be taken into

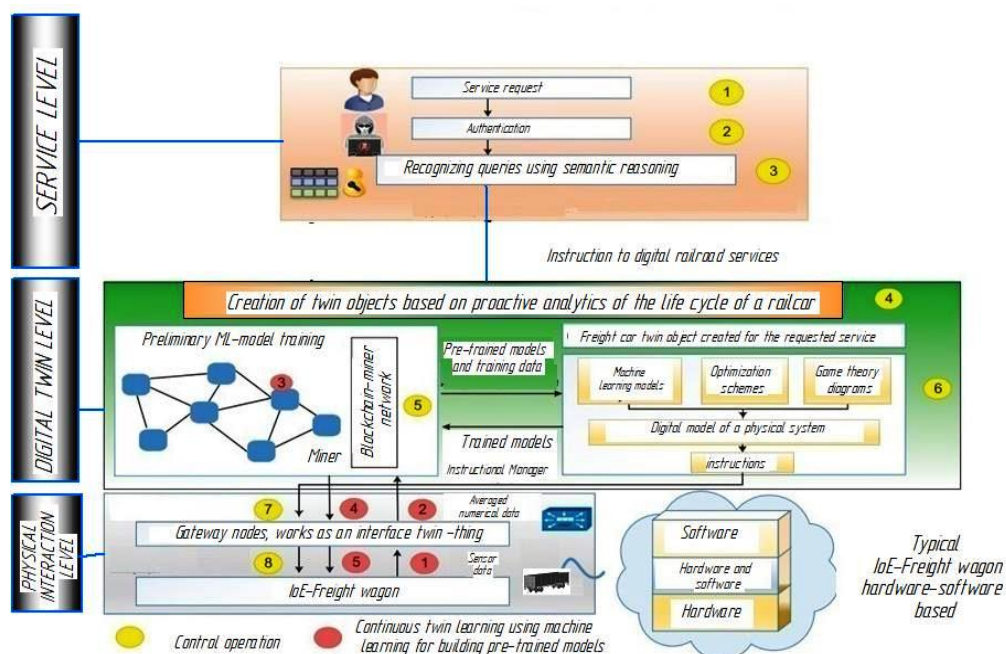


Fig. 1. Algorithm of operation of the digital twin of a freight wagon

account during training. Although centralized machine learning can be used for such scenarios, its disadvantage is that it requires more communication resources to transfer data from end devices to the central server. A solution to this problem can be federated learning, which allows the global model to be constantly updated to improve its efficiency.

In [9], a “five-dimension digital twin model” is presented, in which the problem is considered from a slightly different angle, the model is described by the formula:

$$\text{MDT} = (\text{PE}, \text{VM}, \text{Ss}, \text{DD}, \text{CN}), \quad (1)$$

where PE - physical objects, VM - virtual models, Ss - services, DD - digital twin data, CN - interaction protocols.

Based on the considered model of the digital twin and the described algorithm of the digital twin operation, taking into account the defects obtained in operation considered in the work [11], a new approach to the concepts of the digital twin of a freight car at all stages of the life cycle has been created.

- Product development (**DT-1**);
- Production (**DT-2**);
- Operation (**DT-3**).

Digital twin in development (DT-1). At this stage, the key competitive advantages of a high-tech product are laid, for which a system of digital models of the product and, if necessary, technological processes will be created, interconnected and balanced on a single platform in a multi-level matrix. Tracking structural changes in the design AT the design stage This technique involves determining trends in changes in the properties of the design and its inclusion in calculation models. It is mandatory to conduct patent research on requirements, target indicators and resource constraints.

At this stage, the use of digital twin technology allows for rapid large-scale changes to the design of a product, its subsystems and components, as well as rapid verification of these changes through virtual testing and analysis of the impact of changes in the performance of some subsystems and components on others. This allows for reduced volume of field tests and their number to the minimum permissible and necessary, which in turn reduces the time to market for a competitive product and reduces the cost of development.

Digital twin in production (DT-2). It is responsible for accounting for "technological heredity" and is a system consisting of **DT-1** and information in the form of results of virtual tests and computer modeling of technological processes for manufacturing a product.

Digital twin in operation (DT-3). It is a system consisting of a digital twin of the first stage (**DT-1**), if necessary, a second stage (**DT-2**) and information coming from the operated product. DT-3, in particular, contains information for managing the maintenance and repair of a high-tech product. Here it is worth highlighting the model for diagnosing the state of structures separately in the blocks of digital models. This technique involves calibrating the digital twin to the readings of monitoring systems. Condition diagnostics consists in monitoring the inconsistency of measurement data with the results of the digital twin model (which indicates the occurrence of significant defects). Refined modeling will allow you to localize the places of occurrence of problems in the load-bearing or supporting system. And the model for predicting the residual resource (corrosion, strength)

(Fig. 2). shows, as an example, a digital twin at the development stage of the most popular freight cars for transporting goods.

At this stage, a product requirements management module has been developed, a significant amount of high-precision mathematical modeling of freight car elements has been performed (as an example, (Fig. 3). shows a digital twin of a gondola car at the development stage), a dynamic model of a gondola car has been created, and a software package has been developed to predict the technical condition and development of defects from corrosion and other operating factors. Preparations are underway for the second stage of engineering tests in real operating conditions to verify the applied approaches and developed mathematical models of freight cars.

One of the important tasks of the digital twin is to create end-to-end connections between requirements and technical solutions that need to be adopted as soon as possible to minimize the number of design errors, especially at those stages of development when the car is being manufactured and tested.

The implementation of a digital twin design approach will provide an end-to-end design workflow in a single information space, regardless of the software systems used to calculate freight car components and systems. This, in turn, will provide a powerful synergistic effect during the interaction of different design departments and increase the efficiency of the processes of creating and operating freight cars (Fig. 4).

Conclusions. Scientific research confirms the significant potential of digital twins in increasing the efficiency of rail transport. Analysis of data obtained from digital twins opens up new possibilities for predicting the technical condition of wagons.

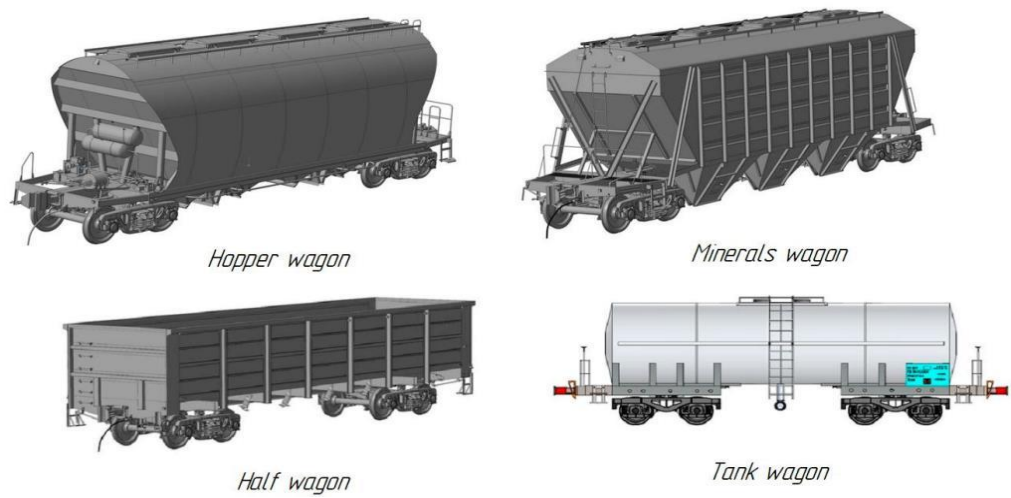


Fig. 2. Digital twins of freight cars under development

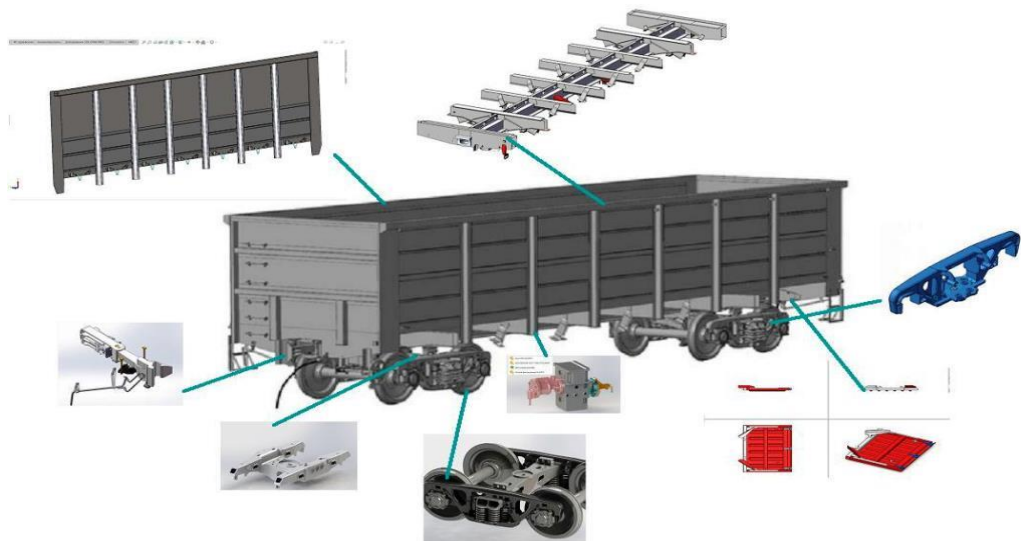


Fig. 3. Digital twin of gondola cars under development

Simulation of various operating scenarios on virtual copies allows for optimization of maintenance and repair modes. Scientifically based algorithms integrated into digital twins contribute to early detection of potential malfunctions. The use of machine learning methods on digital twin data improves the accuracy of predicting failures of components and assemblies. Studies show that digital twins provide a deep understanding of the dynamics of freight wagon behavior during movement.

The practical use of virtual models contributes to increasing the safety of rail transport operations. Digital twins provide valuable information for making informed management decisions regarding the fleet of wagons. The use of digital twins facilitates monitoring the condition of freight wagons in real time.

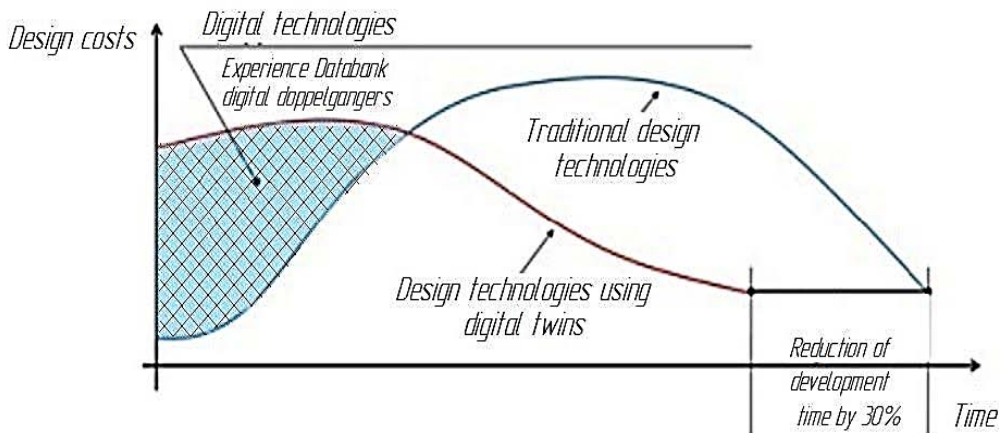


Fig. 4. Transformation of the development system using the concepts of the digital twin of the cargo wagon

The applied value of digital twins lies in the possibility of modeling the impact of various loads on the design of wagons. The introduction of this technology contributes to increasing the throughput of railways by reducing delays. Digital twins can be used to train personnel in the maintenance and operation of wagons. The practical application of virtual copies facilitates the process of certification and testing of new models of freight wagons. The economic effect of the introduction of digital twins is manifested in increasing the service life of wagons.

ЛІТЕРАТУРА

1. The main aspects of the concept of digitalisation of railway transport in Ukraine / V.M. Samsonkin, O.V. Yurchak, V.V. Gaevskiy, V.S. Merkulov, I.H. Biziuk. *Information and control systems in railway transport* : abstracts of poster presentations and speeches of participants of the 33rd International Scientific and Practical Conference "Information and Control Systems in Railway Transport", Kharkiv, 30 October 2020.
2. Dong L, Zhang H, Yu J, Hu G. Energy harvesting potential assessment and systematic design for energy-regenerative shock absorbers on railway freight wagons. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2023. № 35(3). P. 270–290. doi:10.1177/1045389X231200146
3. Aziz A., Chouhan S. S., Schelén O., Bodin U. Distributed Digital Twins as Proxies-Unlocking Composability and Flexibility for Purpose-Oriented Digital Twins. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 137577–137593. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3340132.
4. Haleboua G. Groundtruthing the Digital Twin. *Dialogues in Urban Research*. 2025. <https://doi.org/10.1177/27541258251316856>
5. Timms A., Langbridge A., Antonopoulos A., Mygiakis A., Voulgari E. & O'Donncha F. Agentic AI for Digital Twin. *Proceedings of the AAAI*

- Conference on Artificial Intelligence*. 2025. Vol. 39(28). P. 29703–29705. <https://doi.org/10.1609/aaai.v39i28.35373>
6. Gupta S., Iyer R.S., Kumar S. Digital Twin Challenges. *Digital Twins*. Springer, Cham, 2025. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76564-3_2
 7. Singh S., Oberle M., Schel D., Grimm J., Meyer O., Birke K.P. Digital Twin in the Battery Industry. *Digital Twins, Simulation, and the Metaverse. Simulation Foundations, Methods and Applications* / M. Grieves, E.Y. Hua (eds.). Springer, Cham, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-69107-2_15
 8. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* / F. J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves (Eds). Cham : Springer, 2017. P. 85–113.
 9. Qi Q., Tao F., Hu T., Anwer N., Liu A., Wei Y., Wang L., Nee A. Enabling technologies and tools for digital twin. *J. of Manufacturing Systems*. 2019. DOI: 10.1016/j.jmsy.2019.10.001.
 10. Латиф У. Х., Валид С., Дусид Н., Чжу Х., Чунг С. Х. 6G с поддержкой цифровых двойников: видение, архитектура и перспективы развития. *Беспроводные технологии*. 2023. № 1. С. 6–11.
 11. Fomin O. V., Burlutskiy O. V. Analysis and classification of damages of universal gondola cars that occur during their life cycle. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*. 2012. № 4. С. 163–167.

REFERENCES

1. The main aspects of the concept of digitalisation of railway transport in Ukraine / V.M. Samsonkin, O.V. Yurchak, V.V. Gaevskiy, V.S. Merkulov, I.H. Biziuk // Information and control systems in railway transport: abstracts of poster presentations and speeches of participants of the 33rd International Scientific and Practical Conference "Information and Control Systems in Railway Transport" (Kharkiv, 30 October 2020). 2020.
2. Dong L, Zhang H, Yu J, Hu G. Energy harvesting potential assessment and systematic design for energy-regenerative shock absorbers on railway freight wagons. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2023; 35(3):270–290. doi:10.1177/1045389X231200146
3. A. Aziz, S. S. Chouhan, O. Schelén and U. Bodin (2023). "Distributed Digital Twins as Proxies-Unlocking Composability and Flexibility for Purpose-Oriented Digital Twins," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 137577–137593. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3340132.
4. Halegoua, G. (2025). Groundtruthing the Digital Twin. *Dialogues in Urban Research*, 0(0). <https://doi.org/10.1177/27541258251316856>
5. Timms, A., Langbridge, A., Antonopoulos, A., Mygiakis, A., Voulgari, E., & ODonncha, F. (2025). Agentic AI for Digital Twin. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 39(28), 29703–29705. <https://doi.org/10.1609/aaai.v39i28.35373>

6. Gupta, S., Iyer, R.S., Kumar, S. (2025). Digital Twin Challenges. In: Digital Twins. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76564-3_2
7. Singh, S., Oberle, M., Schel, D., Grimm, J., Meyer, O., Birke, K.P. (2024). Digital Twin in the Battery Industry. In: Grieves, M., Hua, E.Y. (eds) Digital Twins, Simulation, and the Metaverse. Simulation Foundations, Methods and Applications. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-69107-2_15
8. Grieves M., Vickers J. (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems // Kahlen F. J., Flumerfelt S., Alves A. (Eds). Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Cham: Springer, 85–113.
9. Qi. Q., Tao F., Hu. T., Anwer N., Liu A., Wei Y., Wang L., Nee A. (2019). Enabling technologies and tools for digital twin. J. of Manufacturing Systems. DOI:10.1016/j.jmsy.2019.10.001.
10. Latif W. X. Walid S., Dusid. N. Zhu H. , Cheung S. H. (2023). 6G with digital twin support: vision, architecture and development prospects, Wireless Technology, 1: 6–11.
11. Fomin O. V., Burlutskiy O. V. (2012). Analysis and classification of damages of universal gondola cars that occur during their life cycle, Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute, 4: 163–167.

МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.5.064

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2025.2-25.05>

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА НОРМАТИВНА БАЗА ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ НА МОРСЬКОМУ ТРАНСПОРТІ

М.П. Булгаков¹, О.М. Мельник², І.О. Пуляєв³

¹к. т. н., доцент, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-7172-8678

²д. т. н., професор, професор кафедри судноводіння і морської безпеки,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0001-9228-8459

³старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-0592-032X

Анотація

Вступ. Проблема енергоефективності морського транспорту набуває дедалі більшої актуальності в умовах посилення міжнародного екологічного регулювання та зростання вартості енергоресурсів. Судноплавна галузь відіграє фундаментальну роль у глобальній економіці, забезпечуючи основні обсяги міжнародних перевезень, проте залишається одним із помітних джерел викидів парникових газів, зокрема вуглекислого газу (CO₂), оксидів азоту (NO_x) та сірки (SO_x). У відповідь на ці виклики міжнародні організації, зокрема Міжнародна морська організація (ІМО), запроваджують систему технічних і операційних стандартів, які мають забезпечити поступове зниження впливу морських перевезень на довкілля. **Мета.** Метою даного дослідження є системний аналіз сучасних технологій, нормативно-правових вимог та методів прогнозного оцінювання, що можуть бути застосовані для підвищення енергоефективності в морському транспорті. Особливу увагу зосереджено на впливі міжнародних регуляторних ініціатив, зокрема таких як EEDI, SEEMP, EEOI, а також на технологічних інноваціях – від цифрового моделювання до впровадження альтернативних видів палива й адаптивних систем енергоменеджменту. **Результати.** Проведений аналіз свідчить, що поєднання цифрових технологій, передових систем керування та альтернативного енергозабезпечення може істотно знизити обсяги споживання палива і відповідні викиди в атмосферу. Запровадження цифрових двійників і систем машинного навчання виявилось ефективним для підвищення точності прогнозування витрат енергії та виявлення резервів оптимізації. Водночас, хоча впровадження

таких видів палива, як скраплений природний газ, метанол чи водень, потребує значних капітальних інвестицій, вони розглядаються як перспективні напрями декарбонізації галузі. **Висновки.** Результати даного дослідження підтверджують, що інтегрований підхід, який охоплює технологічні інновації та аналітичні інструменти прогнозування, є визначальним чинником у забезпеченні сталого розвитку морського транспорту та вдосконаленні математичних моделей оцінки енергоефективності.

Ключові слова: морські перевезення, експлуатація суден, суднові двигуни, морське паливо, суднопластво, енергоефективність, екологічна безпека, морський транспорт, міжнародні конвенції, оптимізація маршрутів, зменшення вуглецевого сліду, інтелектуальні системи управління.

INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND REGULATORY FRAMEWORK FOR OPTIMIZING ENERGY CONSUMPTION IN MARITIME TRANSPORT

M.P. Bulgakov¹, O.M. Melnyk², I.O. Pulyaev³

¹PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department
of Navigation and Maritime Safety,
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-7172-8678

²Sc. D, Professor, Professor at the Department of Navigation and Maritime Safety,
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-9228-8459

³Senior Lecturer, Department of Navigation and Maritime Safety,
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-0592-032X

Summary

Introduction. The energy efficiency of maritime transport is a key research area due to growing environmental regulations and the need to optimize fuel consumption. Although shipping is a vital sector of the global economy, it is also a major source of greenhouse gas emissions, particularly CO₂, NO₂, and SO₂. To mitigate these impacts, organizations like the International Maritime Organization (IMO) have established regulatory measures to enhance fleet efficiency. Key initiatives include the Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships, the Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) for operational improvements, and the Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI) for assessing in-service performance. Alongside regulations, emerging technologies such as digital twins, predictive analytics, AI-driven control systems, and alternative fuels are gaining importance. These innovations optimize ship performance by leveraging real-time data and environmental conditions, reducing fuel consumption and emissions. Additional strategies, including hybrid propulsion systems, fuel-efficient hull coatings, and advanced energy recovery technologies, contribute to improving energy efficiency. However, large-scale adoption faces challenges such as high capital costs, infrastructure limitations, and the need for specialized training. **Purpose.** This study aims to examine innovative technologies, regulatory frameworks, and predictive modeling methods for optimizing energy use in maritime transport. It evaluates the impact of international standards (EEDI, SEEMP, EEOI) and advanced solutions like digital twins, machine learning, alternative

*fuels, and intelligent management systems. The focus is on their role in reducing fuel consumption, emissions, and improving overall sustainability. **Results.** Findings suggest that integrated approaches significantly lower fuel consumption and CO₂ emissions. The study confirms that digital technologies and energy management systems enhance ship efficiency by optimizing routes, speed, and engine loads in real time. Furthermore, the shift to alternative fuels such as liquefied natural gas (LNG), methanol, and hydrogen holds promise for reducing emissions, though it requires substantial investments and technological adaptation. **Conclusions.** The combination of regulations, technological innovations, and predictive modeling is crucial for achieving maritime energy efficiency. These methods optimize fuel use while promoting environmental sustainability. Future research should focus on refining energy efficiency forecasting models and developing adaptation strategies for stricter environmental standards. Further investigation into alternative fuel viability and hybrid propulsion optimization is necessary to facilitate a cost-effective transition to low-carbon shipping.*

Key words: shipping, environmental safety, energy efficiency, maritime transport, international conventions, route optimization, carbon footprint reduction, intelligent control systems.

Вступ. Енергоефективність морського транспорту набуває все більшого значення в контексті посилення екологічного законодавства та зростання вартості палива. Морський транспорт, на який припадає до 90 % вантажних перевезень у світі, залишається одним з основних джерел викидів вуглекислого газу (CO₂) та інших газів (оксидів азоту, NO_x, та сірки, SO_x). Прийняття міжнародних правових стандартів, таких як Конвенція MARPOL, та рівнів енергоефективності (EEDI, SEEMP) покликане мінімізувати негативні екологічні наслідки суднових викидів. Тим не менш виконання наведених нижче вимог вимагає вирішення низки технологічних, економічних та експлуатаційних проблем [1; 3; 5].

Основні виклики включають у себе:

– високе енергоспоживання суден. Відомо, що судна в усьому світі є неефективними, що призводить до неефективного використання палива та викидів парникових газів [4; 6];

– необхідність упровадження інноваційних технологій. Однак, незважаючи на наявність багатьох енергозберігаючих технологій, їх упровадження вимагає великих капітальних інвестицій і часто супроводжується адаптацією портової або суднової інфраструктури;

– використання альтернативних видів палива. Зріджений природний газ (ЗПГ), метанол і водень пропонуються як альтернативні види палива, але їх використання стримується вартістю необхідної модифікації силових установок, а також безпекою під час транспортування і зберігання;

– екологічні ризики та оцінка викидів. Поряд із проблемою викидів CO₂ особливу роль відіграє контроль викидів NO_x та SO_x, які мають значний вплив на екосистеми прибережних регіонів. Сучасний стан справ вимагає розробки нових стратегій моніторингу та контролю викидів в умовах експлуатації [8; 10].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження показують, що енергоефективність на судах набуває все більшого значення через посилення

екологічних стандартів, а також економічні вигоди від скорочення споживання палива. Зокрема, Міжнародна морська організація встановила Індекс енергоефективності проєктування (EEDI) та План управління енергоефективністю судна (SEEMP) як основні нормативні вимоги до судноплавства для скорочення викидів CO₂ та підвищення ефективності використання палива [6; 7; 8; 20]. Впровадження низьковуглецевих та замічних видів палива (ЗПП, метанол, водень) є перспективним напрямом, але вимагає адаптації судових енергетичних установок та портової інфраструктури [11; 13; 15].

Окрім нормативно-правової бази, дослідження акцентують увагу на інноваційних технічних рішеннях для оптимізації енергоспоживання суден. Наприклад, впровадження цифрових двійників, предиктивної аналітики та систем машинного навчання може підвищити ефективність управління енергоспоживанням на судах [16; 17]. Дослідження також вказують на те, що оптимізація маршрутів і швидкості може суттєво зменшити споживання палива та викиди [3; 12]. Наприклад, останні дані показують, що такі каталізатори, як SCR, можуть зменшити викиди NO_x, а плазмові пальники – викиди відпрацьованих газів [18]. Водночас оцінка викидів і впливу судноплавства на навколишнє середовище залишається критично важливою сферою досліджень, включаючи аналіз зниження вмісту сірки в судовому паливі та його впливу на морські екосистеми [17; 19–22].

Дослідження обґрунтовують той факт, що поєднання нових технологій, альтернативних видів палива та правил ІМО дозволить дуже суттєво підвищити енергоефективність та пом'якшити вплив судноплавства на навколишнє середовище. Однак усе ще потрібні подальші експериментальні дослідження та впровадження нових методів моніторингу викидів у реальних умовах експлуатації.

Постановка проблеми. У низці джерел висвітлюються міжнародні нормативні документи, спрямовані на підвищення енергоефективності суден, зокрема ІМО та індекси енергоефективності (EEDI, SEEMP). Обговорюються рекомендації та вимоги до морського транспорту щодо скорочення викидів парникових газів і поліпшення екологічних показників судноплавства [24; 28].

Представлені роботи присвячені використанню гібридних двигунів, низьковуглецевих та альтернативних видів палива, таких як скраплений природний газ, метанол і водень, а також технологій уловлювання вуглецю [30; 32].

З огляду на вищезазначене, виникає необхідність розробки комплексних рішень, у тому числі:

- впровадження комбінованих систем управління енергоефективністю, що поєднують механічні, хімічні та цифрові технології;
- оптимізація роботи судових енергетичних установок із застосуванням інноваційних технологій, включаючи використання альтернативних видів палива та наноматеріалів;
- створення підходів і моделей для прогнозування та оцінки ефективності запропонованих рішень, які мінімізують викиди при максимізації експлуатаційних характеристик суден.

Формулювання цілей статті. Основною метою дослідження є розробка та оптимізація комбінованих технологій підвищення енергоефективності суден, які дозволять одночасно зменшити споживання палива та викиди шкідливих

речовин, забезпечивши відповідність сучасним екологічним вимогам; мета роботи включає в себе аналіз існуючих технологій, розробку нових методів моніторингу, контроль викидів у реальних умовах експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Міжнародна конвенція із запобігання забрудненню із суден (MARPOL) є одним з основних регуляторних інструментів, спрямованих на захист морського середовища від забруднення із суден. Разом із Міжнародною конвенцією з охорони людського життя на морі (SOLAS) MARPOL вже є міжнародною основою екологічної та експлуатаційної безпеки морських перевезень. Ці документи були розроблені Міжнародною морською організацією (ІМО) і відіграли важливу роль у розвитку нових технологій та підвищенні енергоефективності суден.

На рисунку 1 показано структуру викидів двоокису вуглецю (CO_2) у різних секторах економіки, де видно, що найвагоміший внесок у викиди CO_2 робить сектор виробництва енергії (35 % через споживання викопного палива (вугілля, нафти та природного газу)). Друге місце посідає промисловість (23 %), викиди якої пов'язані з виробничим процесом та використанням тепла.

На транспортний сектор (включно з морським транспортом) припадає 15 % цього показника. У цій категорії викиди викопного палива є результатом спалювання палива у двигунах автомобілів, літаків і суден. Морський транспорт є одним із найбільш енергоємних видів транспорту, тому особливо важливо розробляти нові технології для підвищення енергоефективності суден.

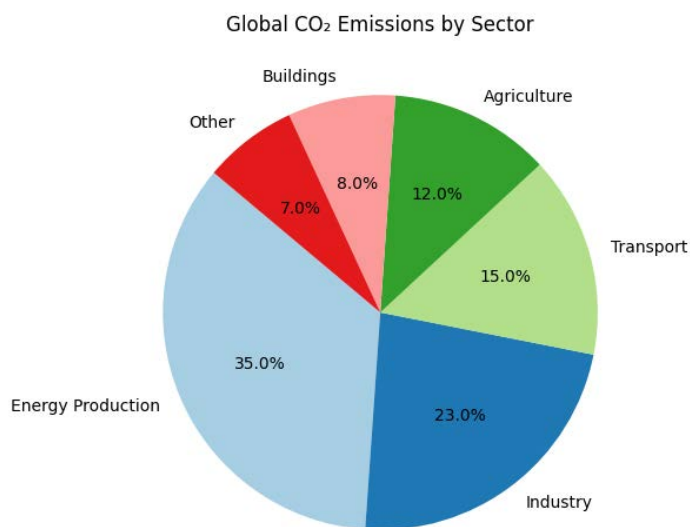


Рис. 1. Глобальні викиди CO_2 за секторами (складено авторами за даними статистичних джерел [2–8])

Як показано вище, решта викидів припадає на сільське господарство (12 %), будівлі (8 %) та інші джерела (7 %). Ця гістограма підкреслює, що, незважаючи на відносно менший внесок транспорту у глобальні викиди порівняно з енергетикою та промисловістю, він залишається ключовою сферою для впровадження заходів зі зменшення вуглецевого сліду.

Основні інструменти управління енергозбереженням представлені на рисунку 2, який складено авторами на основі агрегованих даних із джерел [2–8], що охоплюють усереднені показники глобального розподілу викидів за останнє десятиріччя.

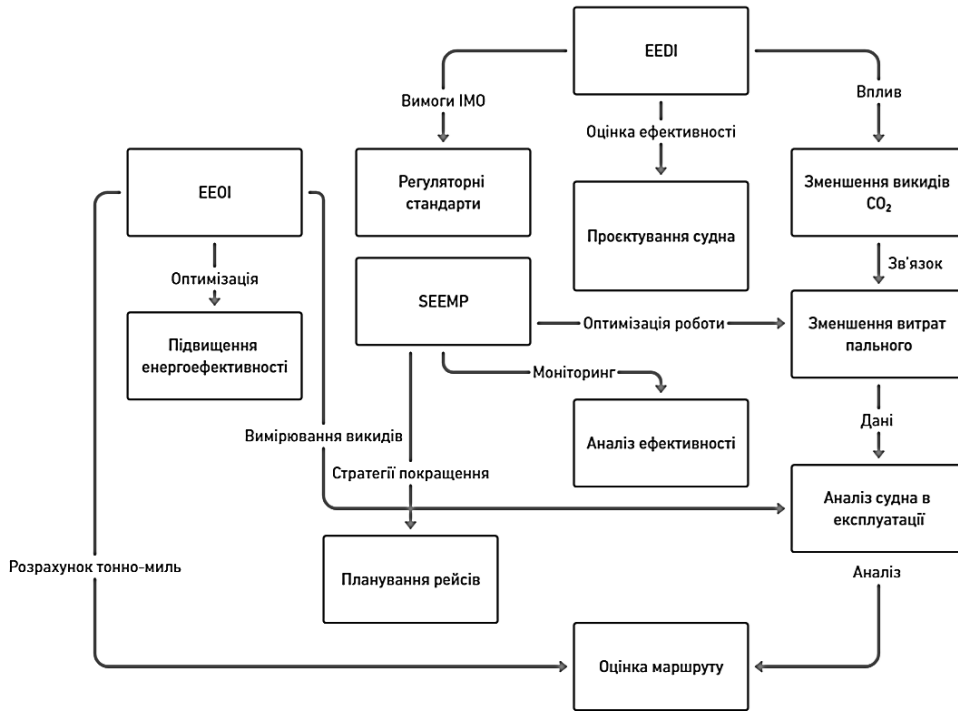


Рис. 2. Основні інструменти управління енергоефективністю (авторська розробка)

Індекс енергоефективності проектування (EEDI) та План управління енергоефективністю судна (SEEMP) є одними з обов’язкових положень щодо енергоефективності, встановлених Комітетом із захисту морського середовища ІМО (МЕРС). EEDI встановлює мінімальний рівень енергоефективності для нових суден, стимулюючи розробку інноваційних конструкцій і технологій для зниження споживання палива і викидів CO₂. SEEMP – це інструмент енергоменеджменту для суден, що перебувають в експлуатації, який передбачає створення детальних планів підвищення енергоефективності та моніторинг прогресу.

Індекс EEDI призначений для вимірювання проектної енергоефективності нових суден. Він розраховується як відношення викидів CO₂ (грам) до індексу транспортної роботи (тонно-миля). EEDI можна розрахувати таким чином:

$$EEDI = \frac{DW \cdot V_{ref} \cdot f_w \cdot f_c}{\sum_i (CF_i \cdot SFC_i \cdot P_i \cdot f_{w,i} \cdot f_i \cdot f_p)}, \quad (1)$$

де CF_i – коефіцієнт перерахунку вуглецю для i -го палива; SFC_i – питома витрата палива i -го двигуна, (г/кВт-год); P_i – потужність i -ї силової установки (кВт);

DW – дедвейт судна (тон); V_{ref} – швидкість судна на випробуваннях (вузлів); f_w – коригувальний коефіцієнт погодних умов; f_c – коефіцієнт завантаженості судна.

$$\sum_i (CF_i \cdot SFC_i \cdot P_i \cdot f_{w,i} \cdot f_i \cdot f_p), \quad (2)$$

$f_{w,i}$ – поправочний коефіцієнт на експлуатаційні умови судна (хвилювання, вітер), f_i – коефіцієнт впливу інноваційних технологій (наприклад, поліпшена аеро- і гідродинаміка), f_p – поправочний коефіцієнт на ефективність пропульсивної установки.

План управління енергоефективністю судна (SEEMP) – це план, що містить заходи і практики, спрямовані на скорочення споживання палива і викидів CO_2 . SEEMP охоплює такі практики:

- оптимізація маршруту: базується на погодних даних і оптимізує маршрути, щоб мінімізувати опір води;
- зниження швидкості: експерименти показують, що 30 % скорочення споживання пального досягається за умови зниження швидкості руху на 10–20 % від початкової швидкості;
- покращення стану корпусу: очищення корпусу та нанесення сучасних покриттів дозволяє ефективно зменшити опір тертя.

ЕЕОІ є ще одним ключовим структурним елементом системи управління енергоефективністю на суднах. Цей показник був розроблений ІМО з метою оцінки ефективності суден у практичних умовах експлуатації. На відміну від EEDI, який фокусується на проєктних характеристиках, ЕЕОІ дозволяє судновласникам і операторам оцінювати споживання енергії на основі фактичних рейсових даних і використовувати їх для коригування експлуатаційних практик. ЕЕОІ розраховується за такою формулою:

$$EEOI = \frac{\sum (FC_i \cdot CF_i)}{\sum (m_i \cdot D_i)}, \quad (3)$$

де FC_i – споживання i -го виду палива (тонни); CF_i – коефіцієнт перерахунку вуглецю для i -го виду палива; m_i – маса вантажу (тони); D_i – пройдена відстань (морські милі).

Графік на рисунку 3 ілюструє тенденцію скорочення викидів двоокису вуглецю (CO_2) на морському транспорті з моменту запровадження Індексу енергоефективності при проєктуванні суден (EEDI). Лінія, позначена як «Базові викиди (без EEDI)», показує рівень викидів без заходів з енергоефективності, де спостерігається лише незначне скорочення завдяки поступовому вдосконаленню систем двигуна та експлуатаційних практик.

Дані, представлені на рис. 3, отримані на основі власних аналітичних розрахунків авторів із застосуванням даних для узагальнених характеристик трьох типів суден: контейнеровозів, балкерів та пасажирських суден. Значення є середніми для типових представників кожної категорії.

Лінії тренду вказують на значне скорочення викидів завдяки заходам EEDI, причому базові викиди знижуються повільніше, а викиди, оптимізовані за допомогою EEDI, знижуються більш різко, майже на 40 % від базового рівня 2013 року до 2050 року. Тому включення прогнозованих тенденцій дає більш чітке уявлення про довгостроковий вплив, підкреслюючи необхідність подальшого впровадження енергоефективних технологій на морському транспорті.

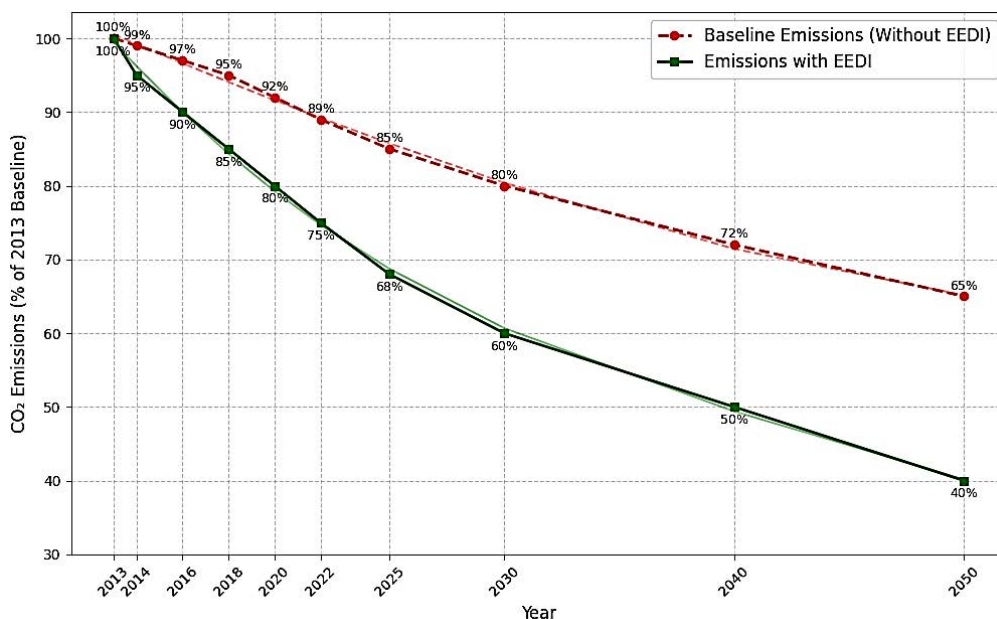


Рис. 3. Скорочення викидів CO₂ з часом завдяки впровадженню EEDI

Для більш точної оцінки енергоефективності морського судна доцільно буде застосувати динамічну систему рівнянь, яка описує взаємозв'язок між основними експлуатаційними параметрами: витратою палива, викидами CO₂ та пройденою відстанню. Нижче наведено ключові математичні залежності, що можуть бути інтегровані в інтелектуальну модель моніторингу паливної ефективності в режимі реального часу.

Рівняння витрати палива залежно від швидкості та погодних умов

$$\frac{dF(t)}{dt} = -k_1 \cdot V(t) + k_2 \cdot W(t) + k_3 \cdot T_f(t), \quad (4)$$

де $F(t)$ – витрата палива в момент часу; $V(t)$ – швидкість судна; $W(t)$ – вплив вітру; $T_f(t)$ – паливний коефіцієнт. k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти, що визначені експериментально та стосуються певних типів суден: контейнеровозів, балкерів та пасажирських суден. Залежність є спрощеною та апроксимує витрату палива в межах обмеженого діапазону швидкостей. У більш загальному випадку опір пропорційний квадрату швидкості, а потужність – її кубу.

Залежність є спрощеною та апроксимує витрату палива в межах обмеженого діапазону швидкостей (типово $\pm 10-15\%$ від номінальної), де лінійна залежність може бути прийнятною для оперативної оцінки. У більш загальному випадку опір пропорційний квадрату швидкості, а потужність – кубу.

Рівняння зміни викидів CO₂:

$$E_{CO_2}(t) = F(t) \cdot K_h(t) \cdot \epsilon, \quad (5)$$

де: $E_{CO_2}(t)$ – викиди CO₂ у момент часу t , $F(t)$ – базова витрата палива (наприклад, для чистого корпусу), $K_h(t)$ – коефіцієнт стану корпусу (обростання, корозія

тощо), ϵ – емісійний коефіцієнт (для дизельного палива ≈ 3.114 кг $\text{CO}_2/\text{кг}$ палива). Врахування стану корпусу обґрунтоване тим, що обростання або пошкодження корпусу підвищують гідродинамічний опір, що, своєю чергою, збільшує витрати палива, яке є єдиним джерелом вуглецю для CO_2 .

Тоді показник енергоефективності буде мати вигляд:

$$E(t) = \frac{D(t)}{F(t) \cdot CF}, \quad (6)$$

де $E(t)$ – показник енергоефективності; $D(t)$ – пройдена відстань; CF – коефіцієнт перерахунку вуглецю.

Система рівнянь для прогнозування енергоефективності:

$$\frac{dF(t)}{dt} = -k_1 \cdot V(t) + k_2 \cdot W(t) + k_3 \cdot T_f(t) \frac{dC_{\text{CO}_2}(t)}{dt} = \alpha \cdot F(t) + \beta \cdot S(t)EE(t) = \frac{D(t)}{F(t) \cdot CF}. \quad (7)$$

Наведена система дозволяє розрахувати як поточну, так і прогнозовану ефективність використання суднового палива, а також дає змогу оцінити екологічні наслідки. Інтеграція цих рівнянь у цифровий двійник або платформу моніторингу судна також здатна забезпечити прийняття рішень у реальному часі та формувати оптимальні маршрути переходу з урахуванням погодних умов, технічного стану судна та стратегій енергозбереження.

Результати дослідження. Оскільки судноплавна галузь прагне зменшити свій вуглецевий слід і відповідати міжнародним стандартам, таким як MARPOL та правила ІМО, виникає потреба в нових підходах, які забезпечать високу енергоефективність та екологічну стійкість. Існує декілька шляхів для досягнення цих цілей. Далі запропоновані методи, спрямовані на покращення експлуатаційних характеристик судна, зменшення споживання палива та мінімізацію викидів парникових газів.

З метою підвищення енергоефективності морських суден, з огляду на сучасні вимоги щодо зменшення викидів та підвищення економічної доцільності експлуатації суден, активно розробляються та впроваджуються інноваційні підходи. Основні напрями розвитку таких технологій представлені у таблиці 1.

Таблиця 1

Основні напрями розвитку (методи) підвищення енергоефективності суден

Напрямок розвитку / Метод	Ключові елементи / Особливості
Використання цифрових технологій	Створення цифрових двійників суден для моніторингу в реальному часі та корекції параметрів їх експлуатації
Застосування методів машинного навчання	Алгоритми машинного навчання для виявлення прихованих залежностей та оптимізації управління паливом
Перехід на альтернативні види палива	Моделювання роботи суден на ЗПГ, водні, метанолі з вибором оптимального варіанту для умов експлуатації
Комбіновані стратегії управління енергоефективністю	Оптимізація маршруту, зниження швидкості, вдосконалення корпусу і конструкції гвинтів для зменшення споживання палива
Розробка математичних моделей для прогнозування енергоефективності	Врахування погодних умов, видів палива та зміни швидкості судна для мінімізації витрат і викидів CO_2

Використання таких підходів дозволяє не лише скорочувати витрати палива й експлуатаційні витрати, а й активно відповідати на сучасні екологічні виклики. А застосування моделей, аналітичних алгоритмів і методів адаптивного управління загалом створює основу для переходу морського транспорту на новий рівень ефективності й сталого розвитку.

На рисунку 4 показано залежність витрати палива від швидкості судна за різних вітрових умов. Сині лінії відповідають умовам слабого вітру (Low Wind, 0.5x), а червоні лінії – умовам сильного вітру (High Wind, 1.5x). Заштрихована область показує діапазон зміни витрати палива залежно від вітрових умов. На низьких швидкостях вплив вітру на витрату палива мінімальний і витрата зростає лінійно зі збільшенням швидкості. Під час сильного вітру збільшення витрати палива стає більш вираженим на високих швидкостях. Заштрихована область показує діапазон, в якому може змінюватися витрата палива у разі зміни вітрових умов. Це підкреслює важливість урахування погодних факторів у плануванні рейсу і виборі оптимальної швидкості.

У разі переходу на середні швидкості вплив вітру поступово зростає, що зумовлює збільшення розкиду значень витрати пального. Це пояснюється тим, що опір води і повітря починає відігравати значну роль у формуванні загального енергетичного балансу судна. В умовах сильного вітру найоптимальнішою стратегією може бути вибір компромісної швидкості, що дозволить мінімізувати витрати палива без значних затримок у графіку перевезень.

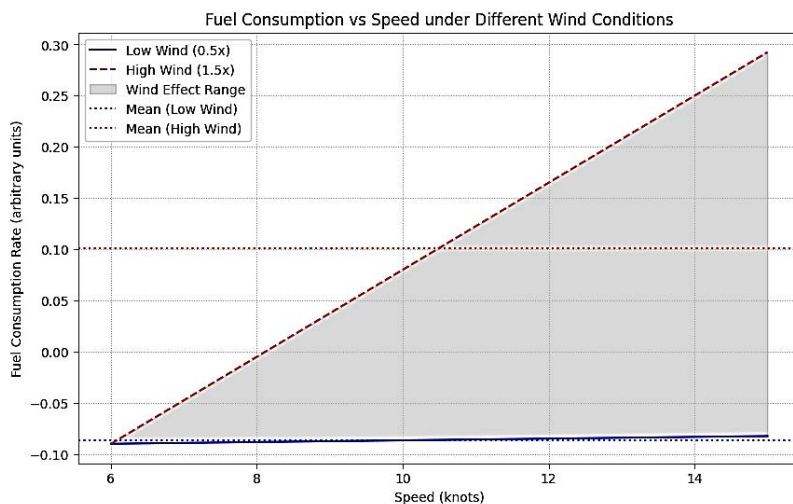


Рис. 4. Вплив швидкості та вітру на витрату палива

На рисунку 5 показано еволюцію викидів CO₂ залежно від стану корпусу з плинном часу. Помаранчева лінія представляє прогнозовані викиди CO₂, а заштрихована область показує можливі коливання викидів у межах $\pm 10\%$ від середнього значення. Заштрихована область показує, наскільки викиди можуть коливатися за різних умов експлуатації судна, таких як забруднення корпусу та погодні умови. Стан корпусу прямо впливає на опір, що призводить до зміни витрати палива і, відповідно, рівня

CO₂. Графік моделює ці змінні з урахуванням цього опосередкованого впливу. Середня лінія викидів (пунктирна лінія) забезпечує базовий рівень, з яким можна порівняти поточні значення для оцінки ефективності експлуатаційних заходів.

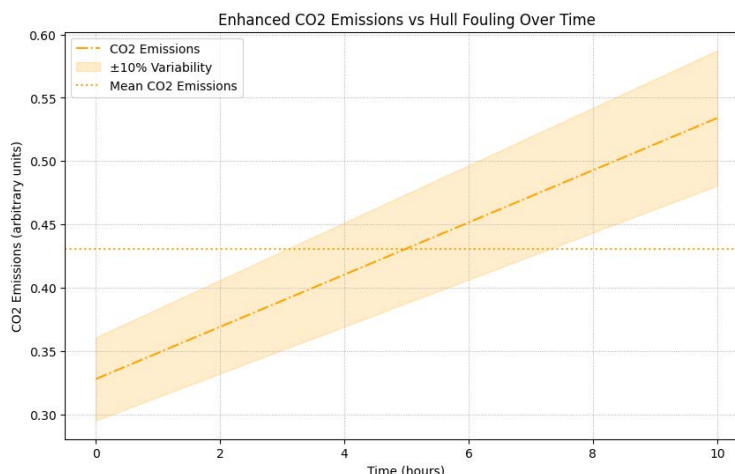


Рис. 5. Динаміка викидів CO₂ залежно від стану корпусу судна

Графік рисунка 6 показує залежність енергоефективності від пройдені відстані з плином часу. Зелена пунктирна лінія відображає зміну енергоефективності, а заштрихована область показує діапазон зміни в межах $\pm 5\%$. Енергоефективність зменшується з часом через збільшення опору корпусу, погіршення погодних умов і збільшення споживання палива. Заштрихована область показує допустимі відхилення значень енергоефективності при зміні зовнішніх умов, таких як швидкість вітру і хвилювання. Пунктирна лінія середнього значення слугує базовою метрикою для оцінки ефективності судна на різних ділянках маршруту.

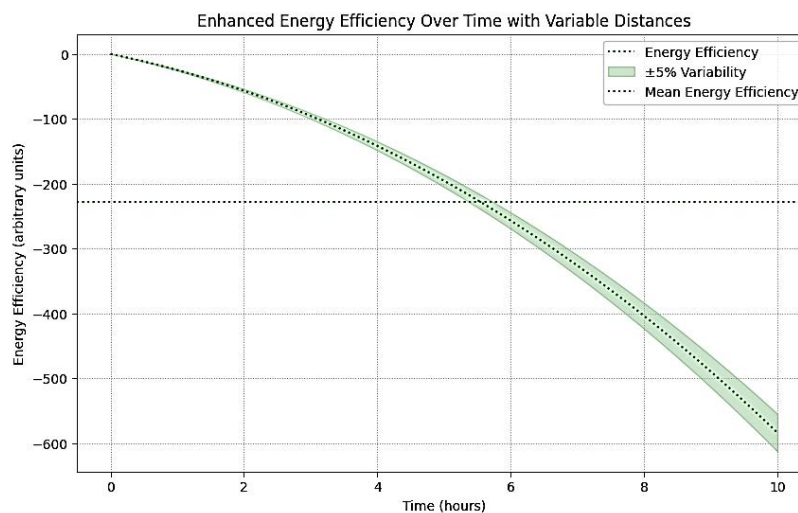


Рис. 6. Залежність енергоефективності від пройдені відстані

Розглянемо більш детально розробку математичних моделей для прогнозування енергоефективності. Основною метою розробки математичних моделей є прогнозування показників енергоефективності судна за різних умов експлуатації. Такі моделі допоможуть власникам та операторам суден приймати більш обґрунтовані рішення щодо маршруту, швидкості та типу палива, що використовується.

Прогнозування енергоефективності може базуватися на диференціальних рівняннях, що описують зміну споживання палива і викидів залежно від часу й умов експлуатації. У таблиці 2 наведено ключові елементи моделей.

Таблиця 2

Ключові елементи моделей

Ключовий елемент	Опис
Зміна погодних умов	Модель враховує швидкість вітру, висоту хвиль і температуру води, які впливають на витрату палива та викиди CO ₂ . Прогнози на основі цих даних дозволяють коригувати маршрут для мінімізації зовнішніх впливів.
Використання різних видів палива	Кожний тип палива має свій коефіцієнт перетворення вуглецю. Моделі враховують ці відмінності для точного прогнозування викидів та оптимізації споживання палива у разі використання альтернативних видів палива.
Зміна швидкості судна	Оптимальна швидкість залежить від стану моря та погодних умов. Модель враховує зміни швидкості на різних ділянках маршруту, щоб зменшити загальне споживання палива.

Новизна цього підходу полягає в комплексному моделюванні енергоефективності. Запропонована система рівнянь дозволяє врахувати декілька факторів, що впливають на споживання палива та викиди: швидкість судна, погодні умови, тип палива, що використовується, та стан корпусу.

Прогнозування викидів у режимі реального часу та інших забруднюючих речовин дозволяє операторам суден заздалегідь коригувати маршрут і швидкість, щоб мінімізувати вплив на навколишнє середовище.

Висновки. Адаптивна система управління на основі даних, зібраних із датчиків на судні, дозволяє використовувати запропоновані моделі для створення адаптивної системи управління, яка буде автоматично регулювати параметри судна залежно від зовнішніх умов.

Ідеальна картина майбутнього енергозбереження в судноплаванні – це картина, в якій кількість споживання палива і парникових газів легко нормалізується. Інтеграція прогнозування та технології цифрових двійників є однією з ключових проблем, які становлять великий інтерес. Судноплавання цифрових двійників дозволить у режимі реального часу моделювати кількість споживаної енергії, прогнозувати майбутні зміни умов експлуатації та апіорі оновлювати точки, відстань, швидкість і маршрут для мінімізації споживання палива. Значний внесок зроблять системи штучного інтелекту, що використовують технології машинного навчання та штучного інтелекту. Ці системи будуть використовуватися як для поглинання знань, зібраних під час попередніх місій, так і для оперативних даних у поточному розташуванні, в автоматичному впорскуванні суднових систем.

Окремої уваги заслуговує розробка нових покриттів для корпусів суден з покращеними гідродинамічними властивостями. Самоочищувальні та протизношувальні

покриття нині також здатні суттєво зменшити втрати на тертя, що дасть поштовх до економії пального та підвищення продуктивності двигунів наступного покоління. Привабливим напрямом є розвиток гібридів, в яких комбінуються двигун внутрішнього згоряння та електричні елементи, який є особливо успішним у країнах із суворим законодавством з питань охорони навколишнього середовища. Існують також інші плани щодо розвитку технологій чистої енергії (наприклад, сонячні панелі, вітрогенератори) для зменшення залежності від викопних видів палива.

Оптимізація маршрутів суден є одним з оперативних інструментів, що використовуються для досягнення енергоефективності на практиці. Використання супутникових даних про погоду, течії та стан водної поверхні відіграватиме певну роль у визначенні найбільш енергоефективного маршруту. Однак одночасно з розробкою все більш досконалих систем теплообміну з'явиться можливість використовувати енергію вихлопних газів двигунів для задоволення потреб судна, що ще більше скоротить споживання палива. Однією з тем для обговорення є перехід на паливо третього покоління (наприклад, водень, аміак або біогаз) і пов'язані з цим величезні викиди CO₂ та інших забруднюючих речовин.

Показники енергоефективності суден у режимі реального часу зрештою мають бути узгоджені на міжнародному рівні. Усе це не тільки підвищить вагомість судноплавних компаній, але й спонукатиме їх активно об'єднуватися, створюючи інноваційні рішення. Виконання всіх вищезазначених кроків призведе до значного скорочення викидів вуглекислого газу в морській індустрії та підвищення конкурентоспроможності судновласників за рахунок зниження собівартості судноплавних операцій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Volyanskaya, Y., Volyanskiy, S., Onishchenko, O., & Nykul, S. (2018). Analysis of possibilities for improving energy indicators of induction electric motors for propulsion complexes of autonomous floating vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(8), 25–32.
2. International Maritime Organization (2023, July). 2023 IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/IMO-Strategy-on-reduction-of-GHG-emissions-from-ships.aspx>
3. Hüffmeier, J., & Johanson, M. (2021). State-of-the-art methods to improve energy efficiency of ships. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(447). <https://doi.org/10.3390/jmse9040447>
4. Rajeev, J. (2018). Ship energy efficiency: Here is all you need to know. Retrieved from: <https://www.myseatime.com/blog/detail/ship-energy-efficiency>
5. Maritime Cyprus. (2018). Energy efficiency in shipping: Why it matters. Retrieved from: <https://maritimecyprus.com/2018/04/03/energy-efficiency-in-shipping-why-it-matters>
6. International Maritime Organization (2016). Train the trainer (TTT) course on energy efficient ship operation: Module 2 — Ship energy efficiency, regulations and related guidelines. London.

7. International Maritime Organization (2009). Guidelines for voluntary use of the ship EEOI. MEPC.1/Circ.684.
8. International Maritime Organization (2013). Guidance on treatment of innovative energy efficiency technologies for calculation and verification of the attained EEDI for ships in adverse conditions. MEPC.1/Circ.815.
9. Yuan, Y., Li, Z., Malekian, R., & Yan, X. (2017). Analysis of the operational ship energy efficiency considering navigation environmental impacts. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 16(3), 150–159.
10. GloMEEP. (n.d.). Energy efficiency technologies information portal. Retrieved from: <https://glomeep.imo.org/resources/energy-efficiency-technologies-information-portal>
11. Shivam, S. (2019). Ship energy efficiency. Retrieved from: <http://themarineexpress.com/ship-energy-efficiency>
12. Hannes, J., & Styhre, L. (2015). Increased energy efficiency in short sea shipping through decreased time in port. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 71, 167–178.
13. Comer, B., & Osipova, L. (2021). Accounting for well-to-wake carbon dioxide equivalent emissions in maritime transportation climate policies. Retrieved from: <https://theicct.org/publication/accounting-for-well-to-wake-carbon-dioxide-equivalent-emissions-in-maritime-transportation-climate-policies>
14. Rayhan, F. (2021). Ship pollution and emission: A recent fact ship emissions & pollution: A real threat to global warming.
15. Yan, S. (2012). Study on ship pollution prevention measures. In *7th International Conference on System of Systems Engineering (SoSE)* (pp. 283–285).
16. Melnyk, O. M., Onishchenko, O. A., Shibaev, O. G., Kuznichenko, S. O., Bulgakov, M. P., Shcherbina, O. V., Yaremenko, N. O., & Voloshyn, D. A. (2024). Development of strategies for reducing nitrous oxide emissions from marine diesel engines. *Journal of Chemistry and Technologies*, 32(2), 465–479. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i2.297410>
17. Melnyk, O. M., Onishchenko, O. A., Shyshkin, O. V., Volkov, O. M., Volyansky, S. M., Maulevych, V. O., & Kreitser, K. O. (2024). Enhancing shipboard technical facility performance through the utilization of low-sulfur marine fuel grades. *Journal of Chemistry and Technologies*, 32(1), 233–245. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i1.297916>
18. Rodríguez García, M. I., Rodrigues, M., González-Enrique, J., Ruiz Aguilar, J., & Turias, I. (2023). Forecasting air pollutants using classification models: A case study in the Bay of Algeciras (Spain). *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1–25. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02512-2>
19. Thomson, H., Corbett, J. J., & Winebrake, J. J. (2015). Natural gas as a marine fuel. *Energy Policy*, 87, 153–167.
20. Jang, J., Ahn, S. Y., Na, S., Koo, J., Roh, H., & Choi, G. (2022). Effect of a plasma burner on NOx reduction and catalyst regeneration in a marine SCR system. *Energies*, 15(4306). <https://doi.org/10.3390/en15124306>

21. Micco Di, S., Silvestri, L., Antonio, F., Jannelli, E., & Minutillo, M. (2022). Economic-comparative study for carbon neutrality during ships docking and in port operations: A path towards maritime sector decarbonisation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2385, 012049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2385/1/012049>
22. Ding, J., Mijling, R., Jalkanen, J. P., Johansson, L., & Levelt, P. (2018). Maritime NO_x emissions over Chinese seas derived from satellite observations. *Geophysical Research Letters*, 45. <https://doi.org/10.1002/2017gl076788>
23. Fu, Q., Shen, Y., & Zhang, J. (2012). On the ship pollutant emission inventory in Shanghai port. *Journal of Safety and Environment*, 12, 57–64.
24. Tian, Y., Ren, L., Wang, H., Li, T., Yuan, Y., & Zhang, Y. (2022). Impact of AIS data thinning on ship air pollutant emissions inventories. *Atmosphere*, 13(1135). <https://doi.org/10.3390/atmos13101135>
25. Indian Register of Shipping. (2015). Implementing energy efficiency design index. Mumbai. Retrieved from: http://www.irclass.org/files/marine_publications/EEDI_2015.pdf
26. Pronin, S., Belousov, E., Marchenko, A., Gritsuk, I., & Bulgakov, N. (2020). Research of the gas fuel supply process on the compression stroke in ship's low-speed gas-diesel engines. *SAE Technical Paper*, 2020-01-2107. <https://doi.org/10.4271/2020-01-2107>
27. International Maritime Organization (2015). Third IMO GHG study 2014: Executive summary and report.
28. Bilgili, L. (2021). Life cycle comparison of marine fuels for IMO 2020 sulphur cap. *Science of the Total Environment*, 774, 145719.
29. Theotokatos, G., Stoumpos, S., Bolbot, V., & Boulougouris, E. (2020). Simulation-based investigation of a marine dual-fuel engine. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 19(Sup1), 5–16.
30. Ammar, N. (2023). Methanol as a marine fuel for greener shipping: Case study tanker vessel. *Journal of Ship Production and Design*, 39, 1–11. <https://doi.org/10.5957/JSPD.03220012>
31. Petetin, H., Guevara, M., Compernelle, S., Bowdalo, D., Bretonnière, P. A., Enciso, S., Jorba, O., Lopez, F., Soret, A., & Pérez García-Pando, C. (2023). Potential of TROPOMI for understanding spatio-temporal variations in surface NO₂ and their dependencies upon land use over the Iberian Peninsula. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 3905–3935. <https://doi.org/10.5194/acp-23-3905-2023>
32. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., Shumylo, O., Voloshyn, A., Ocheretna, V., & Fedorenko, O. (2024). Implementation research of alternative fuels and technologies in maritime transport. *Studies in Systems, Decision and Control*, 510, 13–21. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_2

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВА БІОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ В СУДНОВИХ ДИЗЕЛЯХ

В.В. Мадей¹, Ю.В. Заблоцький², А.С. Сагін³

¹к. т. н., судновий механік I-го розряду,

Одеса, Україна,

ORCID ID: 0000-0002-8692-9077

²к. т. н., доцент, доцент кафедри суднових енергетичних установок,
Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна,

ORCID ID: 0000-0002-6207-8802

³д-р філософії, доцент кафедри суднових енергетичних установок,
Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна,

ORCID ID: 0009-0000-4965-6121

Анотація

Вступ. Одним із негативних факторів, що впливають на довкілля під час використання в суднових дизелях палива нафтового походження, є емісія шкідливих речовин, які входять до складу випускних газів. Саме через це в енергетичних установках суден морського та внутрішнього водного транспорту все більше застосування отримують альтернативні палива, в тому числі паливо біологічного походження. Водночас рекомендації щодо використання палива біологічного походження не вказують на його оптимальні концентрації в суміші з паливом нафтового походження, а також не визначають найбільш ефективні режими роботи суднових дизелів під час їх експлуатації на подібних сумішах. Це є стимулом для проведення досліджень щодо визначення впливу палива біологічного походження на екологічність судноплавства та енергоефективність морських суден, а також вибору оптимальних режимів експлуатації суднових дизелів під час використання сумішей, до яких входять палива біологічного походження. **Мета** дослідження – визначення впливу палива біологічного походження на експлуатаційні показники роботи суднових дизелів та розробка рекомендацій щодо визначення його раціональної концентрації в суміші з паливом нафтового походження. **Результати.** Визначено, що суднові дизелі є не лише основними тепловими двигунами, які використовуються на судах морського та внутрішнього водного транспорту, але й джерелами викидів шкідливих речовин з випускними газами. Зазначено, що зменшення емісії оксидів азоту та діоксиду вуглецю можливе шляхом використання в суднових дизелях паливних сумішей, до складу яких входять палива біологічного походження. Під час досліджень, що виконувались на суднових дизелях Wartsila 6L32, використовувались палива нафтового походження RMG500 та DMA10, а також їх суміші з паливом біологічного походження FAME. Було встановлено, що під час використання сумішей, до складу яких входить 10–30 % палива біологічного походження FAME, емісія оксидів азоту знижується на 11,20–27,10 %, за тих же умов емісія діоксиду вуглецю знижується на 5,31–19,47 %. **Висновки.** Встановлено, що використання в суднових дизелях паливних

сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження, є одним зі способів, що підвищують рівень екологічної стійкості морських суден та сприяють екологічному судноплавству.

Ключові слова: екологічні показники, емісія шкідливих компонентів, морський транспорт, паливна суміш, паливо біологічного походження, паливна економічність, паливо нафтового походження, судновий дизель.

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF USING FUELS OF BIOLOGICAL ORIGIN IN MARINE DIESEL ENGINES

V.V. Madey¹, Yu.V. Zablotskyi², A.S. Sagin³

¹PhD (Engineering), I class marine engineer,
Odesa, Ukraine,

ORCID ID: 0000-0002-8692-9077

²PhD (Engineering), Associate Professor,
Senior Lecturer at the Department of Ship Power Plants,
National University "Odessa Maritime Academy", Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-6207-8802

³PhD, Senior Lecturer at the Department of Ship Power Plants,
National University "Odessa Maritime Academy", Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0000-4965-6121

Summary

Introduction. One of the negative factors affecting the environment when using petroleum-based fuels in marine diesel engines is the emission of harmful substances that are part of the exhaust gases. It is because of this that alternative fuels, including fuels of biological origin, are increasingly being used in the power plants of marine and inland waterway transport vessels. At the same time, recommendations for the use of fuels of biological origin do not indicate its optimal concentrations in a mixture with petroleum-based fuels, and do not determine the most effective operating modes of marine diesel engines during their operation on such mixtures. This is an incentive for conducting research to determine the impact of fuels of biological origin on the environmental friendliness of shipping and the energy efficiency of seagoing vessels, as well as the selection of optimal operating modes of marine diesel engines when using mixtures that include fuels of biological origin. **The purpose** of the study is to determine the impact of bio-fuel on the operational performance of marine diesel engines and to develop recommendations for determining its rational concentration in a mixture with petroleum-based fuel. **Results.** It was determined that marine diesel engines are not only the main heat engines used on ships of maritime and inland waterway transport, but also sources of emissions of harmful substances with exhaust gases. It is noted that reducing emissions of nitrogen oxides and carbon dioxide is possible by using fuel mixtures in marine diesel engines that include bio-based fuel. During the studies carried out on Wartsila 6L32 marine diesel engines, RMG500 and DMA10 petroleum-based fuels were used, as well as their mixtures with FAME bio-based fuel. It was found that when using mixtures containing 10–30 % of biological FAME fuel, nitrogen oxide emissions are reduced by 11.20–27.10 %, under the same conditions, carbon dioxide emissions are reduced by 5.31–19.47 %. **Conclusions.** It was found that the use of

fuel mixtures containing biological fuel in marine diesel engines is one of the ways to increase the level of environmental sustainability of seagoing vessels and promote ecological shipping.

Key words: *environmental indicators, emission of harmful components, maritime transport, fuel mixture, biological fuel, fuel efficiency, petroleum fuel, marine diesel.*

Вступ. Основним негативним фактором, що супроводжує використання в судових дизелях палива нафтового походження, є його шкідливий вплив на довкілля. Насамперед це пов'язано з емісією оксидів та діоксиду вуглецю CO та CO₂, оксидів сірки SO_x, а також оксидів азоту NO_x. У зв'язку з цим саме ці екологічні показники роботи судових дизелів регламентуються та контролюються міжнародними організаціями та класифікаційними товариствами [1–3].

Викиди оксидів азоту NO_x, а також вміст сірки S у судовому паливі (яка є джерелом утворення оксидів сірки SO_x) регламентуються вимогами Annex VI MARPOL [4; 5].

Викиди оксиду вуглецю CO та діоксиду вуглецю CO₂ нині не регламентуються вимогами міжнародних морських конвенцій. При цьому величина CO₂ є визначальною у розрахунку коефіцієнтів Energy Efficiency Design Index (EEDI) та Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI). За вимогами Marine Environment Protection Committee of International Maritime Organization (IMO) величини EEDI і EEXI для існуючих суден та суден, що будуються, повинні мати мінімально можливі значення [6–8].

Постановка проблеми. Одним зі способів забезпечення екологічного судноплавства, зниження негативного впливу на довкілля, скорочення викидів, а також підвищення енергоефективності є використання альтернативних видів палива, зокрема палива біологічного походження – біодизельного палива. Біодизельне паливо застосовуються як у стаціонарній, так і в судовій енергетиці. При цьому немає системного підходу до його використання. Водночас рекомендації щодо використання палива біологічного походження не вказують на його оптимальні концентрації в суміші з паливом нафтового походження, а також не визначають найбільш ефективні режими роботи судових дизелів під час їх експлуатації на подібних сумішах [9–11]. Це є стимулом для проведення досліджень щодо визначення впливу біодизельного палива на екологічність судноплавства та енергоефективність морських суден, а також вибору оптимальних режимів експлуатації судових дизелів під час використання сумішей, до яких входить біодизельне паливо [12–14].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання використання палива біологічного походження розглядаються з точки зору зменшення негативного впливу випускних газів судових дизелів на довкілля. При цьому різноманіття типів судових дизелів, їх експлуатаційних режимів, а також сортів палива нафтового та біологічного походження призводить до отримання широкого спектру результатів [15–17].

Як окреме джерело енергії біодизельне паливо не використовується. Перш за все це пов'язане з його більш високою (порівняно з дизельним паливом) густиною та в'язкістю. Це негативно впливає на параметри процесу паливоподачі,

впорскування та розпилування палива, що погіршує якість перебігу цих процесів. Зниження в'язкості біодизельного палива шляхом його додаткового нагріву призводить до підвищеного утворення парафіну та подальшого коксування паливної апаратури високого тиску [18–20]. Ще однією причиною, яка обмежує використання біодизельного палива як окремого джерела енергії, є його нижча порівняно з нафтовими паливами теплотворна здатність [21–23]. Як правило, ця величина не перевищує 37500–38000 кДж/кг, що менше майже на 10 % за теплотворну здатність важкого палива класу RM та майже на 15 % за теплотворну здатність дизельного палива класу DM. У зв'язку з цим біодизельне паливо змішується в різних пропорціях з моторним (дизельним / легким або важким) паливом [24–26]. Собівартість виробництва біодизельного палива в більшості країн світу вища, ніж собівартість палива нафтового походження, а рентабельність біопаливного бізнесу поступається рентабельності переробки нафти. Однак використання біодизельного палива суттєво покращує екологічні характеристики суднових дизелів, зокрема знижує емісію оксидів азоту, оксидів вуглецю та оксидів азоту. Це стає важливою перевагою використання біодизельного палива під час знаходження суден морського та внутрішнього водного транспорту в спеціальних екологічних районах [27–29].

Формулювання цілей статті. У зв'язку з вищевикладеним, метою дослідження було визначення ефективності використання палива біологічного походження в суднових дизелях.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводили на спеціалізованому морському судні, призначеному для транспортування 8600 TEU. До складу допоміжної енергетичної установки судна входили чотири однотипні суднові середньооборотові дизелі Wartsila 6L32.

Експлуатація дизелів проводилася на двох видах палива – DMA10 (під час плавання судна в районах SECAs) та RMG500 (під час плавання судна поза районами SECAs). Крім того, була передбачена можливість експлуатації дизелів на паливній суміші, до складу якої як основне входило паливо RMG500 або DMA10, як додаткове – біодизельне паливо FAME. Основні характеристики палив DMA10, RMG500, FAME наведені у таблиці 1.

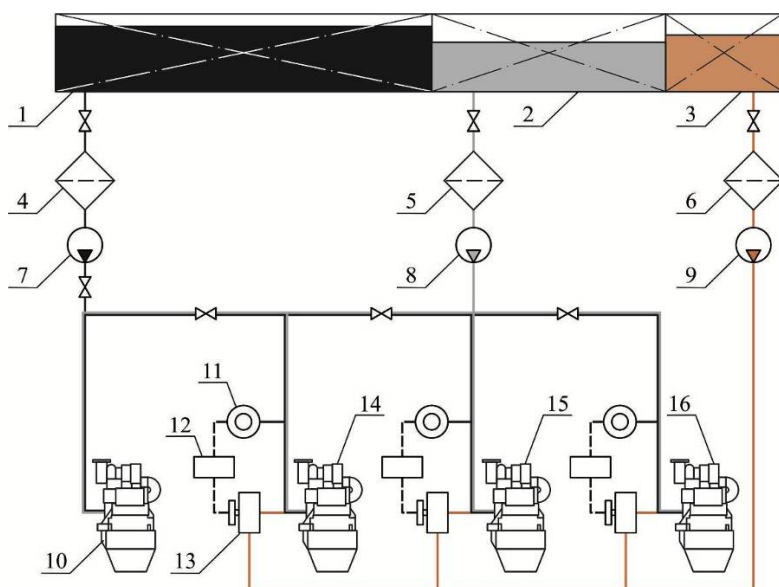
Таблиця 1

Характеристики моторних палив

Характеристика	Марка палива		
	DMA10	RMG500	FAME
Густина при 20°	884	962	926
В'язкість при 40°	9,4	496	314
Вміст сірки, %	0,057	0,48	0,022
Нижча теплотворна здатність, кДж/кг	43280	39070	37720

Принципова схема паливної системи дизелів Wartsila 6L32 показана на рис. 1.

Експлуатація дизелів виконувалась у такій спосіб. Під час перебування судна поза екологічними районами експлуатація дизелів здійснювалась на паливі RMG500, яке знаходилось у витратному танку 1. Стан палива RMG500



*Рис. 1. Принципова паливна схема суднових дизелів Wartsila 6L32:
1 – паливо RMG500; 2 – паливо DMA10; 3 – паливо FAME; 4, 5, 6 – паливні
фільтри для палив RMG500, DMA10, FAME відповідно; 7, 8, 9 – паливні насоси
для палив RMG500, DMA10, FAME відповідно; 10, 14, 15, 16 – дизелі;
11 – витратомір; 12 – мікроконтролер; 13 – дозатор*

(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-якому разі не перевищувала трьох.

Під час перебування судна в особливих екологічних районах експлуатація дизелів здійснювалась на паливі DMA10, яке знаходилось у витратному танку 2. Вміст сірки в паливі не перевищував 0,1 %, що забезпечувало вимоги Annex VI MARPOL. подача палива DMA10 до дизелів здійснювалась паливним насосом 8 після додаткового очищення палива в паливному фільтрі 5.

Крім вказаних варіантів, експлуатацію дизелів також можливо було виконувати з використанням паливної суміші, до складу якої входило біодизельне паливо FAME. подача палива FAME до дизелів здійснювалась паливним насосом 9 після додаткового очищення палива в паливному фільтрі 6. Вміст палива FAME в складі суміші змінювався в діапазоні 10–30 % за масою. Паливна суміш, що складалась з палива RMG500 або DMA10 та біодизельного палива FAME, утворювалась шляхом дозування палива FAME в загальний потік палива RMG500 або DMA10. Дозування біодизельного палива FAME забезпечувалось дозатором 13, якій встановлювався на магістралі його подачі до кожного з дизелів. Кількість біодизельного палива FAME в суміші залежала від витрати палива RMG500 або DMA10, що контролювалась витратоміром 11. Управління роботою дозатора 13

біодизельного палива FAME забезпечувалось мікроконтролером 12. Використання суміші палива RMG500 або DMA10 та біодизельного палива FAME було можливе для дизелів 14, 15, 16. При цьому:

- у дизелі 14 використовувалась паливна суміш, яка складалася з 90 % палива нафтового походження (RMG500 або DMA10) та 10 % біодизельного палива FAME;
- у дизелі 15 – паливна суміш із 80 % RMG500 або DMA10 та 20 % FAME;
- у дизелі 16 – паливна суміш із 70 % RMG500 або DMA10 та 30 % FAME.

Саме на цих дизелях виконувались експериментальні дослідження з визначення ефективності використання біодизельного палива FAME. Дизель 10 експлуатувався виключно на паливі RMG500 або DMA10, без використання паливної суміші, до складу якої входило біодизельне паливо FAME.

Основні параметри роботи паливної системи (тиск, витрата, температура, в'язкість палива) контролювалися та підтримувалися автоматично. Також автоматично підтримувалася частота обертання та навантаження допоміжних двигунів Wartsila 6L32. Крім того, автоматично підтримувався розподіл навантаження між кількома допоміжними двигунами (двама або трьома) у разі їхньої паралельної роботи. Дизелі були обладнані системою діагностики ProPower, яка забезпечувала контроль основних показників робочого процесу – тиску згоряння p_z , ефективної потужності N_e , питомої ефективної витрати палива b_e , температури випускних газів t_f . Система ProPower також здійснювала контроль та аналіз випускних газів дизелів, у тому числі визначення концентрації оксидів азоту NO_x . Система ProPower належить до сучасних систем діагностики робочого процесу суднових дизелів та використовується на великій кількості морських суден [30; 31].

Споживачами енергії суднових дизелів Wartsila 6L32 були машини та механізми суднових систем, а також рефрижераторні контейнери, які разом зі звичайними контейнерами транспортувалися судном (саме через наявність рефрижераторних контейнерів допоміжна енергетична установка судна характеризувалась високою потужністю). Їхня кількість для кожного з морських переходів була різною, але не змінювалась під час транспортування. Це забезпечувало різні між собою, але майже постійні протягом одного морського переходу навантаження на суднову електростанцію (та відповідно на суднові дизелі Wartsila 6L32, які виконували функції допоміжних). При цьому експлуатаційні режими суднової електростанції забезпечувались 50 %, 60 %, 70 % та 80 % навантаженням на суднові дизелі, на яких виконувались дослідження.

Альтернативні палива (в тому числі палива біологічного походження, до яких належить FAME) порівняно з паливами нафтового походження відрізняються іншим структурним складом, іншою теплотворною здатністю та іншим стехіометричним відношенням. Це призводить до певних відмін під час перебігу процесів його згоряння та розширення. У сукупності це є причиною зміни економічних, екологічних, а також температурних показників роботи суднових дизелів під час використання палива біологічного походження або паливних сумішей, до складу яких воно входить. Як такі показники під час досліджень приймалися:

- концентрація оксидів азоту у випускних газах – NO_x , г/(кВт·год);
- концентрація діоксиду азоту у випускних газах CO_2 , %;
- питома витрата палива, b_e , г/(кВт·год);
- середня температура газів на виході з циліндрів, t_f , °C.

Експериментальні дослідження виконувались виключно на сталих режимах роботи судових дизелів. При цьому шляхом перерозподілу споживачів енергії (кількості рефрижераторних контейнерів та судового допоміжного обладнання) підтримувалося однакове навантаження на дизелях, що були задіяні в експериментах. Тривалість випробувань на кожному з експериментальних режимів становила не менше двох годин. Під час проведення досліджень дизелі використовували однакові сорти палива (або RMG500, або DMA10 та їх суміші з паливом біологічного походження FAME). Мащення дизелів виконувались на одному і тому ж сорті циркуляційного мастила [32; 33]. У системах мащення та охолодження дизелів підтримувались однакові значення температури та тиску. Це забезпечувало коректність проведення експерименту та достовірність отриманих результатів. Під час досліджень також контролювались та підтримувались у необхідному діапазоні основні показники робочого циклу дизеля (тиск наприкінці стиснення, максимальний тиск згоряння, середній індикаторний тиск) та їх відхилення від середнього значення за всіх циліндрів [34; 35].

Результати досліджень подані у вигляді рис. 2–5.

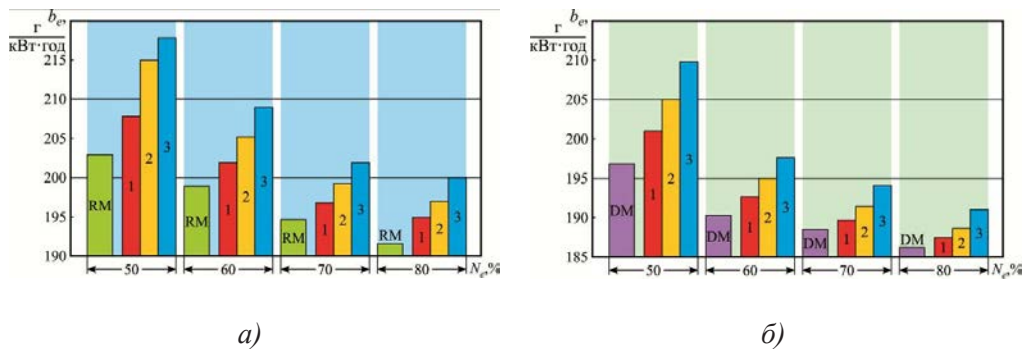


Рис. 2. Питома витрата палива під час різних умов експлуатації дизелів Wartsila 6L32: а) паливо RMG500 та його суміші з FAME; б) паливо DMA10 та його суміші з FAME; RM – паливо RMG500; DM – паливо DMA10; 1, 2, 3 – суміші палив RMG500 (або DMA10) та 10 %, 20 %, 30 % FAME відповідно

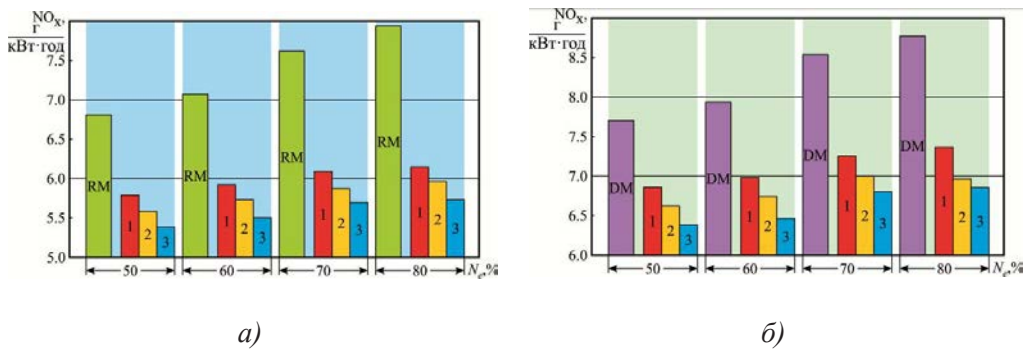


Рис. 3. Емісія оксидів азоту під час різних умов експлуатації дизелів Wartsila 6L32: а) паливо RMG500 та його суміші з FAME; б) паливо DMA10 та його суміші з FAME; RM – паливо RMG500; DM – паливо DMA10; 1, 2, 3 – суміші палив RMG500 (або DMA10) та 10 %, 20 %, 30 % FAME відповідно

Технологія проведення досліджень була погоджена з технічним відділом судноплавної компанії, що забезпечує менеджмент судна та його судової енергетичної установки. Усі випробування виконувались із суворим дотриманням рекомендації з технічної експлуатації дизелів, а також із виконанням вимог Міжнародних конвенцій MARPOL та SOLAS.

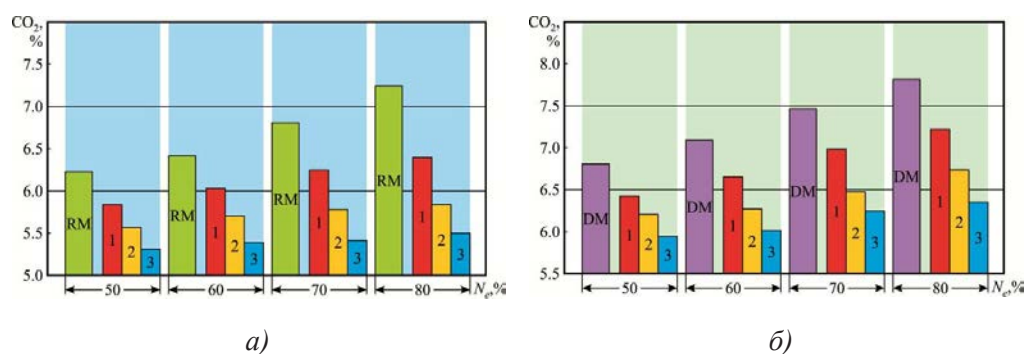


Рис. 4. Емісія діоксиду вуглецю під час різних умов експлуатації дизелів Wartsila 6L32: а) паливо RMG500 та його суміші з FAME; б) паливо DMA10 та його суміші з FAME; RM – паливо RMG500; DM – паливо DMA10; 1, 2, 3 – суміші палив RMG500 (або DMA10) та 10 %, 20 %, 30 % FAME відповідно

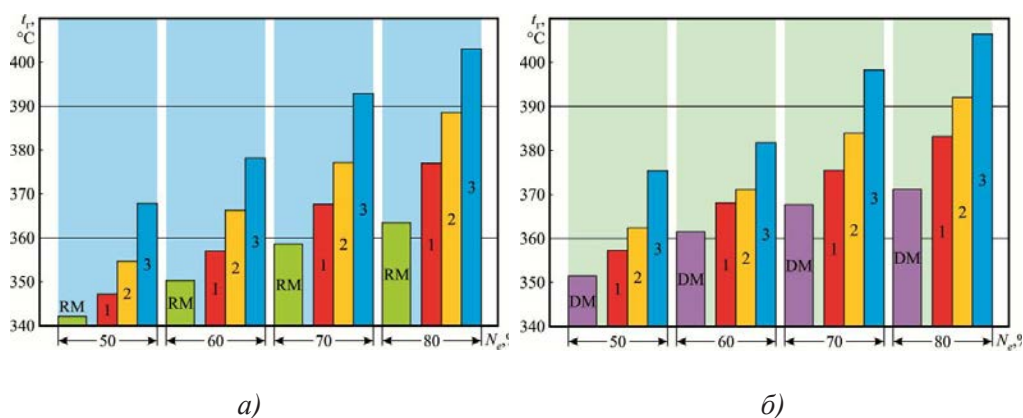


Рис. 5. Середня температура газів на виході з циліндрів під час різних умов експлуатації дизелів Wartsila 6L32: а) паливо RMG500 та його суміші з FAME; б) паливо DMA10 та його суміші з FAME; RM – паливо RMG500; DM – паливо DMA10; 1, 2, 3 – суміші палив RMG500 (або DMA10) та 10 %, 20 %, 30 % FAME відповідно

Висновки. Використання під час експлуатації судових енергетичних установок палив нафтового походження (дизельних або дистилатних) призводить до забруднення довкілля шкідливими домішками, що входять до складу випускних газів, та зумовлює пошук шляхів підвищення екологічності судноплавства. Це, а також тенденція до виснажування природних запасів рідких вуглеводів, які є основною сировиною під час виготовлення палив нафтового походження, сприяють поширенню використання на морських судах палив біологічного походження.

У результаті досліджень, що були виконані на судових середньообертових дизелях Wartsila 6L32, було встановлено таке.

1. Утворення паливних сумішей, до складу яких входить паливо нафтового та біологічного походження, з різним вмістом в цих сумішах палива біологічного походження сприяє поліпшенню екологічності судноплавства. При цьому під час використання сумішей, до складу яких входить 10–30 % біодизельного палива FAME, емісія оксидів азоту знижується на 11,20–27,10 %, за тих же умов емісія діоксиду вуглецю знижується на 5,31–19,47 %.

2. Паливні суміші, до складу яких входить паливо біологічного походження, порівняно з паливом нафтового походження характеризуються меншою теплотворною здатністю. Це призводить до збільшення на 1,7–7,4 % (залежно від складу паливної суміші та навантаження на дизель) питомої витрати подібних паливних сумішей. Також негативним фактором використання паливних сумішей, до складу яких входить біодизельне паливо, є підвищення температурного навантаження на циліндрову групу та газовипускную систему дизелів. Це відображається в збільшенні температури газів на виході з циліндрів, яке на деяких експлуатаційних режимах (а саме під час використання паливних сумішей з максимально можливим вмістом палива біологічного походження) може досягати 22–36°C.

3. Використання в суднових дизелях альтернативних палив (одним із яких є біодизельне паливо та паливні суміші, до складу яких воно входить) є одним зі способів, що підвищують рівень екологічної стійкості морських суден та сприяють екологічному судноплавству.

ЛІТЕРАТУРА

1. 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. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
2. 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>.
3. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships. Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2022. Вип. 45. С. 5–16. doi: [10.31653/smf45.2022.5-16](https://doi.org/10.31653/smf45.2022.5-16).
4. Заблоцький Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок. *Вісник Одеського національного морського університету : зб. наук. праць*. 2020. № 2(62). С. 106–119. DOI: [10.47049/2226-1893-2020-1-106-119](https://doi.org/10.47049/2226-1893-2020-1-106-119).
5. 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. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
6. 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](https://doi.org/10.31653/smf47.2023.122-130).

7. 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.
8. 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 : 10.31653/smf341.2020.20-25.
9. Zablotskyi, Yu.V. The use of chemical fuel processing to improve the economic and environmental performance of marine internal combustion engines. Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”, Beijing, PRC. August 31, 2019. Part 1. P. 131–138. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36257.
10. Goolak S., Riabov I., Petrychenko O., Kyrychenko M., Pohosov O. The simulation model of an induction motor with consideration of instantaneous magnetic losses in steel. Advances in Mechanical Engineering. 2025. Vol. 17(2). doi:10.1177/16878132251320236.
11. Madey V. Assessment of the efficiency of biofuel use in the operation of marine diesel engines. Technology Audit and Production Reserves. 2022. № 2(1(64)). С. 34–41. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.255959>.
12. Sagin S., Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines. J. Mar. Sci. Eng. 2025. Vol. 13(3). 589 p. <https://doi.org/10.3390/jmse13030589>.
13. Neumann S., Varbanets R., Minchev D., Malchevsky V., Zalozh V. Vibrodiagnostics of marine diesel engines in IMES GmbH systems. Ships and Offshore Structures. 2022. № 18(11). P. 1535–1546. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2128558>.
14. 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: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.
15. 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 p. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.
16. 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.
17. 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 : 10.31653/smf340.2020.49-54.

18. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів. Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2018. Вип. 38. С. 132–142.
19. 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.
20. Varbanets R., Shumylo O., Marchenko A., Minchev D., Kurnats V., Zalozh V., Aleksandrovska N., Brusnyk R., Volovyk K. Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines. Polish maritime research. 2022. № 29(4). P. 88–96. <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
21. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Оцінка ефективності використання палива біологічного походження в суднових дизелях. Матеріали VI міжнародної морської науково-практичної конференції кафедри СЕУ і ТЕ ОНМУ «Marine Power Plants & Operation MPP&O-2025». URL: <https://2025.depas.od.ua>.
22. Petrychenko O. Migration and evolutionary analysis of trends in the transformation of maritime education in wartime conditions. Transport Systems and Technologies. 2024. № 44. P. 66–79. DOI: 10.32703/2617-9059-2024-44-5.
23. 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. Одеса : НУ«ОМА». С. 118–131. DOI: 10.31653/smf46.2023.118-131.
24. 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.
25. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи суднових середньооберткових дизелів. Водний транспорт : збірник наукових праць. 2025. Вип. 1(42). С. 166–179. DOI: 10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
26. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів експлуатації суднових двигунів внутрішнього згоряння під час використання біодизельного палива. Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2024. Вип. 48. Одеса : НУ «ОМА». С. 100–113. DOI: 10.31653/smf48.2024.100-113.
27. Petrychenko O., Levinskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport. Transport Systems and Technologies. 2024. Vol. 43. P. 21–36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2
28. Petrychenko O., Levinskyi M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport. Sustainability. 2025. Vol. 17. P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.

29. 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: 10.31653/smf44.2022.132-141.
30. Varbanets R., Fomin O., Pištěk V., Klymenko V., Minchev D., Khrulev A., Zalozh V., Kučera P. Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9. № 3. P. 321. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.
31. Сагін А.С., Заблоцький Ю.В. Регенерація змащувальних властивостей моторних палив і мастил під час експлуатації суднових дизелів. Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2022. Вип. 45. Одеса : НУ «ОМА». С. 17–30. DOI: 10.31653/smf45.2022.17-30.
32. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings. *Lubricants*. 2025. Vol. 13(4). 146 p. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.
33. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Визначення впливу антифрикційних покриттів на технічний стан підшипників ковзання дизелів морських суден. Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. 2024. Вип. 49. Одеса : НУ «ОМА». С. 110–123. DOI: 10.31653/smf49.2024.110-123.
34. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Дослідження впливу органічних нанопокриттів на забезпечення процесів мащення підшипникових вузлів суднових дизелів. *Водний транспорт : збірник наукових праць*. 2025. Вип. 2(43). С. 177–195. DOI: 10.33298/2226-8553.2025.2.43.15.
35. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр суднових дизелів. *Водний транспорт : збірник наукових праць*. 2024. Вип. 1(39). С. 206–215. DOI: 10.33298/2226-8553.2024.1.39.21.

REFERENCES

1. Sagin, A.S., Zablotskyi, Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels. (2021). *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 7–8. 14–17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
2. 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>.
3. Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Tkachenko, I. (2022). Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships. *Ship power plants*, 45, 5–16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
4. Zablotskyi, Yu.V. (2020). *Pidvishenya palivnoi ekonomichnosti sudnovih*

- dizelnih ustanovok. Visnik Odeskogo nacionalnogo morskogo universitety, 2, 106–119. DOI: 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.
5. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines. (2021). Austrian Journal of Technical and Natural Sciences.7-8, 36–43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
 6. Sagin, S.V., Suvorov, P.S., Bondar, S.A. (2023). Rozrobka metodu ocinki rizykyv vineknenya avariinih podii pid chas eksplyatacii dizeliv morskikh suden. Sudnovi energetichni ustanovki, 47, 122–130. doi: 10.31653/smf47.2023.122-130.
 7. Poberezhniy, R.V., Sagin, S.V. Zabezpechenya ekologichnykh pokaznykiv dizeliv suden richkovogo ta morskogo transport. (2020). Sudnovi energetichni ustanovki, 41, 5–9. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-9.
 8. Zverkov, D.O., Sagin, S.V. (2020). Znizhenya mechanichnykh vtrat u sudnovich dizelyach. Sudnovi energetichni ustanovki, 41, 20–25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
 9. Zablotskyi, Yu.V. (2019). The use of chemical fuel processing to improve the economic and environmental performance of marine internal combustion engines. Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”, Beijing, PRC. August 31, 2019. Part 1. P. 131–138. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36257.
 10. Goolak, S., Riabov, I., Petrychenko, O., Kyrychenko, M., Pohosov, O. (2025). The simulation model of an induction motor with consideration of instantaneous magnetic losses in steel. Advances in Mechanical Engineering, 17(2). doi:10.1177/16878132251320236
 11. Madey, V. (2022). Assessment of the efficiency of biofuel use in the operation of marine diesel engines. Technology Audit and Production Reserves, 2(1(64)), 34–41. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.255959>.
 12. Sagin, S., Haichenia, O., Karianskyi, S., Kuropyatnyk, O., Razinkin, R., Sagin, A., Volkov, O. (2025). Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines. J. Mar. Sci. Eng, 13(3), 589. <https://doi.org/10.3390/jmse13030589>.
 13. Neumann, S., Varbanets, R., Minchev, D., Malchevsky, V., Zalozh, V. (2022). Vibrodiagnostics of marine diesel engines in IMES GmbH systems. Ships and Offshore Structures, 18(11), 1535–1546. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2128558>.
 14. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, A.S. (2021). Robota sudnovogo dizelya na biodizelnom palivi. Avtomatizaciya sudnovih tehnychnih zasobiv, 27, 93–107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.
 15. Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Matieiko, O., Razinkin, R., Stoliaryk, T., Volkov O. (2024). Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel. Journal of Marine Science and Engineering, 12, 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.

16. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, S.S., Chinshir, V.I., Razinkin, R.O. (2023). Analiz ekologichnoi stiicosti ta energetuchnoi efectivnosti vicoristanya scrubernogo ochishenya vipusknich gaziv dizeliv sudden morskogo transportu. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 47, 157–171.
17. Rusnak, D.Y., Sagin, S.V. (2020). Zabezpechenya ekologichnich vumog pri ultrazvukovii desulphurizacii vuglevodnich paliv. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 40, 49–54. DOI : 10.31653/smf340.2020.49-54.
18. Sagin, S.V. (2018). Znizhenya energetichnih vtrat v precizionih parah palivnoi aparaturi sudnovich dizeliv. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 38, 132–142.
19. Sagin, S.V., Stolyaryk, T.O. (2021). Dinamika sudnovih dizeliv pid chas vikoristanya motornich mastil z rizmimi structurnimi karakteristikami. *Avtomatizaciya sudnovih tehnicnih zasobiv*, 27, 108–119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
20. Varbanets, R., Shumylo, O., Marchenko, A., Minchev, D., Kyrnats, V., Zalozh, V., Aleksandrovska, N., Brusnyk, R., Volovyk, K. (2022). Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines. *Polish maritime research*, 29(4), 88–96. <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
21. Sagin, S.V., Zablotskyi, Yu.V., Sagin, A.S. (2025). Otsinka efektyvnosti vykorystannia palyva biolohichnoho pokhodzhennia v sudnovykh dyzeliakh. *Materialy VI mizhnarodnoi mors'koi naukovo-praktychnoi konferentsii kafedry SEU i TE ONMU «Marine Power Plants & Operation MPP&O–2025»*. URL: <https://2025.depas.od.ua>.
22. Petrychenko, O. (2024). Migration and evolutionary analysis of trends in the transformation of maritime education in wartime conditions. *Transport Systems and Technologies*, 44, 66–79. DOI: 10.32703/2617-9059-2024-44-5.
23. Sagin, S.V., Sagin, A.S. (2023). Kontrol ta diahnostuvannia nadiinosti ta ekonomichnosti dyzeliv morskykh ta richkovykh zasobiv transportu. *Sudnovi enerhetychni ustanovky*, 46, 118–131. <https://doi.org/10.31653/smf46.2023.118-131>.
24. Zablotskyi, Yu.V., Sagin, A.S. (2022). Vyznachennia dynamichnykh navantazhen' pid chas zminy rezhymiv mashchennia pretsyzijnykh par palyvnoi aparatury sudnovykh dyzeliv. *Sudnovi enerhetychni ustanovky*, 44, 121–131. <https://doi.org/10.31653/smf44.2022.121-131>.
25. Sagin, S.V., Zablotskyi, Yu.V., Sagin, A.S. (2025). Pidvyshchennia ekonomichnosti roboty sudnovykh serednoobertovykh dyzeliv. *Vodnyi transport*, 1(42), 166–179. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20>.
26. Sagin, S.V., Kuropiatnyk, O.A. (2024). Vyznachennia optymalnykh rezhymiv ekspluatatsii sudnovykh dvhyuniv vnutrishnoho zghoriannia pid chas vykorystannia biodyzelnoho palyva. *Sudnovi enerhetychni ustanovky*, 48, 100–113. <https://doi.org/10.31653/smf48.2024.100-113>.
27. 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
28. Petrychenko, O., Levynskiy, M., Goolak, S., Lukoševičius, V. (2025). Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport. *Sustainability*, 17, 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
 29. Sagin, S.V., Poberezhniy, R.V. Analiz osnovnich sposobiv znizhenya emisii oksidiv azotu dizeliv suden morskogo ta vnutrishnego vodnogo transportu. (2022). *Sudnovi energetichni ustanovki*, 44, 132–141. doi: 10.31653/smf44.2022.132-141.
 30. Varbanets, R., Fomin, O., Pištěk, 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), P. 321. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.
 31. Sagin, A.S., Zablotskiy, Yu.V. (2022). Reheneratsiia zmashchuvalnykh vlastyvostei motornykh palyv i mastyl pid chas ekspluatatsii sudnovykh dyzeliv. *Sudnovi enerhetychni ustanovky*, 45, 17–30. <https://doi.org/10.31653/smf45.2022.17-30>.
 32. Sagin, S., Sagin, A., Zablotskiy, Y., Fomin, O., Pišteck, V., Kučera, P. (2025). Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings. *Lubricants*, 13(4), 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.
 33. Sagin, S.V., Zablotskiy, Yu.V., Sagin, A.S. (2024). Vyznachennia vplyvu antyfriksiinykh pokryttiv na tekhnichni stan pidshypnykiv kovzannia dyzeliv morskyykh suden. *Sudnovi enerhetychni ustanovky*, 49, 110–123. <https://doi.org/10.31653/smf49.2024.110-123>.
 34. Sagin, S.V., Zablotskiy, Yu.V., Sagin, A.S. (2025). Doslidzhennia vplyvu orhanichnykh nanopokrytt na zabezpechennia protsesiv mashchennia pidshypnykovykh vuzliv sudnovykh dyzeliv. *Vodnyi transport*, 2(43), 177–195. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.15>.
 35. Sagin, A.S., Sagin, S.V. (2024). Eksperymentalne vyznachennia optymalnykh faz podachi palyva v tsylindr sudnovykh dyzeliv. *Vodnyi transport*, 1(39), 206–215. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.21>.

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

С.В. Сагін¹, О.А. Куропятник²

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

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

Анотація

Вступ. Рух суден морського та внутрішнього водного транспорту неможливий без використання двигунів внутрішнього згорання, які нині є основним генератором механічної енергії. Використання альтернативних видів енергії (сонячної, вітрової, а також енергії різного типу акумуляторних батарей) обмежено для суден, що здійснюють тривалі автономні навігаційні переходи. Основним видом палива, що використовується в суднових дизелях та надалі сприяє отриманню ефективної потужності, є рідке паливо нафтового походження. Круговий робочий цикл суднового дизеля неможливий без утворення випускних газів, до складу яких входять небезпечні токсичні компоненти. Суднові дизелі, що перебувають в експлуатації, вимагають постійного пошуку ефективних способів зниження токсичності випускних газів, насамперед викидів оксидів азоту. Актуальність цього завдання підтверджується вимогами міжнародних та національних конвенцій, що регламентують вміст оксидів азоту у випускних газах залежно від типу дизеля та року побудови судна. Забезпечення вимог цих конвенцій можливе шляхом використання різних способів, одним з яких є рециркуляція випускних газів. **Мета** дослідження – визначення впливу системи рециркуляції випускних газів високого тиску на екологічні показники роботи суднового малообертового дизеля. **Результати.** Розглянуті питання щодо забезпечення екологічних показників суднових дизелів шляхом використання систем рециркуляції випускних газів високого тиску. Висвітлені особливості систем рециркуляції випускних газів високого тиску, що встановлюються на суднових малообертових дизелях високої потужності. Наведені результати досліджень, що виконувались на судновому малообертовому дизелі 8G60ME MAN Diesel, обладнаному системою рециркуляції випускних газів високого тиску. Конструкційною особливістю цих систем є повернення деякої кількості випускних газів повз газовий турбонагнітач до циліндру дизеля. Це сприяє погіршенню складу паливо-повітряної суміші в циліндрі та через це зменшує температуру згорання. Саме це явище перериває ланцюгову реакцію утворення оксидів азоту та зменшує рівень їх емісії. **Висновки.** Експериментально встановлено, що зміна ступеня рециркуляції випускних газів у діапазоні 5–20 % забезпечує зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах відповідно на 5,7–38,5 % залежно від навантаження дизеля.

Негативним фактором використання системи рециркуляції впускних газів високого тиску є підвищення температурних навантажень на циліндрову групу та газо-впускну систему судового дизеля.

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

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

S.V. Sagin¹, O.A. Kuropyatnyk²

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

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

Summary

Introduction. *The movement of sea and inland waterway vessels is impossible without the use of internal combustion engines, which are currently the main generator of mechanical energy. The use of alternative energy sources (solar, wind, as well as energy from various types of batteries) is limited to vessels that make long autonomous navigational crossings. The main type of fuel used in marine diesel engines and subsequently contributes to obtaining effective power is liquid fuel of petroleum origin. The circular operating cycle of a marine diesel engine is impossible without the formation of exhaust gases, which include dangerous toxic components. Marine diesel engines in operation require a constant search for effective ways to reduce the toxicity of exhaust gases, primarily nitrogen oxide emissions. The relevance of this task is confirmed by the requirements of international and national conventions that regulate the content of nitrogen oxides in exhaust gases depending on the type of diesel engine and the year of construction of the vessel. Ensuring the requirements of these conventions is possible by using various methods, one of which is exhaust gas recirculation. **The purpose** of the study is to determine the impact of the high-pressure exhaust gas recirculation system on the environmental performance of a low-speed marine diesel engine. **Results.** To consider the issue of ensuring the environmental performance of marine diesel engines by using high-pressure exhaust gas recirculation systems. The features of high-pressure exhaust gas recirculation systems installed on high-power low-speed marine diesel engines are highlighted. The results of research carried out on the 8G60ME MAN Diesel low-speed marine diesel engine equipped with a high-pressure exhaust gas recirculation system are presented. The design feature of these systems is the return of a certain amount of exhaust gases past the gas turbocharger to the diesel cylinder. This contributes to the deterioration of the composition of the fuel-air mixture in the cylinder and, therefore, reduces the combustion temperature. It is this phenomenon that interrupts the chain reaction of the formation of nitrogen oxides and reduces the level of their emissions. **Conclusions.** It has been experimentally established that changing*

the degree of exhaust gas recirculation in the range of 5–20 % provides a decrease in the concentration of nitrogen oxides in exhaust gases by 5.7–38.5 %, respectively, depending on the load of the diesel engine. A negative factor in using a high-pressure exhaust gas recirculation system is the increase in temperature loads on the cylinder group and the gas exhaust system of a marine diesel engine.

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

Вступ. Двигуни внутрішнього згоряння / дизелі займають у судновій енергетиці домінуюче положення порівняно з іншими типами теплових двигунів – паровими котлами та газовими турбінами. Насамперед це пов’язано з найменшою питомою витратою палива та найбільшим коефіцієнтом корисної дії, що характерно саме для дизелів [1; 2]. Дизелі, що встановлюються на суднах морського та внутрішнього водного транспорту, виконують функції головних та допоміжних двигунів, забезпечуючи рух судна та роботу суднових систем, механізмів та обладнання. Отримання корисної роботи та ефективної потужності в суднових дизелях неможливе без спалювання в їхніх циліндрах рідкого палива нафтового походження. При цьому в результаті його згоряння в атмосферу викидаються випускні гази. Більшу частину випускних газів (до 99,0–99,2 %) становлять нейтральні та нетоксичні компоненти – продукти неповного згоряння (більшою частиною яких є діоксид вуглецю CO_2 і водяна пара H_2O) та повітря зі зниженим вмістом кисню. Невелику решту із загальної частини випускних газів становлять токсичні компоненти, які поділяються на дві групи. До першої групи належать продукти неповного згоряння палива – монооксид вуглецю CO , вуглеводні C_nH_m , альдегіди R-CHO та сажа C . Токсичні компоненти другої групи утворюються в результаті повного окислення хімічних елементів, що входять до складу палива та повітря – це оксиди азоту NO_x та сірки SO_x . Суднові ДВЗ, що знаходяться в експлуатації, вимагають постійного пошуку ефективних способів зниження токсичності випускних газів, насамперед викидів оксидів азоту NO_x [3; 4]. Вміст оксидів азоту у випускних газах регламентується вимогами Annex VI Міжнародної конвенції MARPOL та залежить від року побудови судна та частоти обертання валу дизеля (табл. 1) [5; 6].

Таблиця 1

**Максимальна концентрація оксидів азоту (NO_x , г/кВт·год)
в випускних газах суднових дизелів відповідно до вимог Annex VI MARPOL**

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

Забезпечення вимог Tier I, Tier II можливе шляхом додаткової підготовки палива (наприклад, його гомогенізації, ультразвукової обробки та виготовлення водопаливних емульсій) та вдосконалення робочого циклу (наприклад, управління фазами подачі повітря, випуску газів та впорскування палива). Забезпечення

вимог Tier III можливо лише через використання додаткових технічних систем та пристроїв. Найбільш поширеними з них є: система очищення випускних газів – Selective Catalytic Reduction (SCR); системи рециркуляції – Exhaust Gas Recirculation (EGR); система перепуску – Exhaust Gas Wastegate (EWR) [7, 8].

Постановка проблеми. Екологічні показники суднових дизелів внутрішнього згоряння нині займають основну позицію разом з іншими показниками їхньої роботи – енергетичними та економічними [9; 10]. Постійне підвищення потужності та кількості суднових дизелів, що встановлюються на судах морського та внутрішнього водного транспорту, призводить до пропорційного збільшення кількості випускних газів, що потрапляють в атмосферу та забруднюють її. Це змушує провідні фірми, що виробляють дизелі, а також наукові організації, які виконують відповідні дослідницькі розробки, постійно вдосконалювати методи щодо зниження емісії шкідливих компонентів випускних газів та їх негативного впливу на довкілля [11; 12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системи рециркуляції випускних газів насамперед розроблялися для автомобільного транспорту (як для бензинових, так і для дизельних двигунів) [13; 14]. Позитивний досвід їх застосування, а також необхідність пошуку нових рішень для забезпечення екологічних показників роботи дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту сприяли впровадженню даних систем до складу суднових енергетичних установок [15; 16]. Залежно від характеристик дизеля (конструкційного виконання, потужності, характеристик системи наддуву), щоб забезпечити процес рециркуляції випускних газів, використовуються різні схеми: високого тиску (High pressure – HP-EGR), низького тиску (Low pressure – LP-EGR) і комбінована система (High and Low pressure – HLP-EGR) [17, 18].

Система рециркуляції випускних газів (як низького, так і високого тиску) включає [19; 20]:

- клапан рециркуляції (за допомогою якого здійснюється керування потоком газів, що надходять на рециркуляцію) [21; 22];
- скруббер (призначений для очищення випускних газів від твердих незгорілих частинок під час їхнього повернення до циліндрів дизеля) із системою водяного зрошення та охолодження випускних газів [23; 24];
- газовий нагнітач (за допомогою якого забезпечується рециркуляція випускних газів у продувний ресивер або до компресора газового турбонагнітача) [25; 26].

Через повернення частини випускних газів у циліндр дизеля змінюється склад повітряного заряду, призначеного для згоряння палива. Передусім це призводить до зменшення коефіцієнта надлишку повітря та далі – до зниження інтенсивності згоряння та зменшення максимальної температури під час згоряння [27; 28]. Це стає основною причиною переривання ланцюгової реакції утворення оксидів азоту та зменшення рівня їх емісії. Водночас через перенесення частини процесу згоряння на лінію розширення збільшується процес догоряння палива, що відображається на підвищенні питомої витрати палива та температури випускних газів [29; 30]. Таким чином, розв'язання завдання підвищення екологічної ефективності суднових дизелів та зниження токсичності їхніх випускних газів стикається з дилемою підтримання температурної напруженості суднових дизелів та забезпечення їх економічності.

Формулювання цілей статті. У зв'язку з вищевикладеним, метою дослідження було визначення впливу системи рециркуляції випускних газів високого тиску на основні експлуатаційні показники роботи судових дизелів.

Виклад основного матеріалу. Дослідження виконувались на судовому малооборотовому дизелі 8G60ME фірми MAN Diesel, обладнаному системою рециркуляції газів високого тиску – HP-EGR. Принципова схема системи рециркуляції випускних газів високого тиску судового малооборотового дизеля 8G60ME фірми MAN Diesel дана на рис. 1.

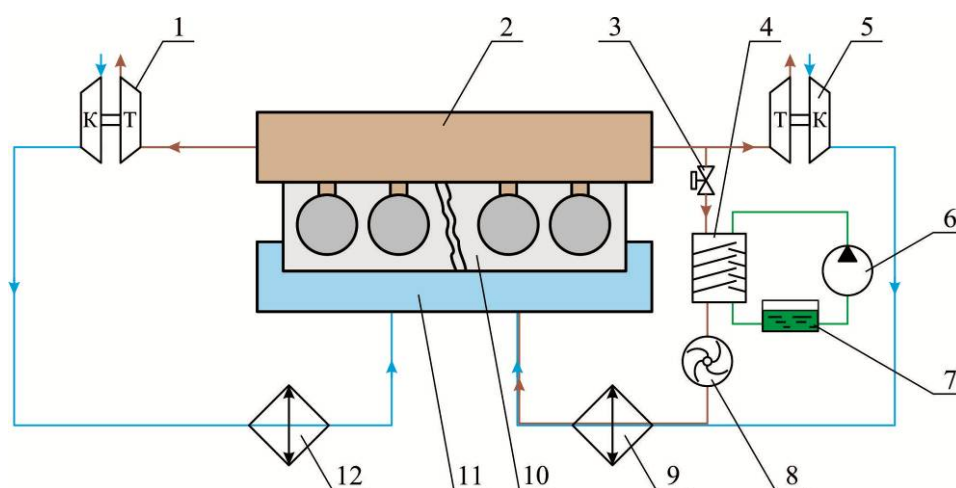


Рис. 1. Принципова схема системи рециркуляції випускних газів високого тиску судового малооборотового дизеля 8G60ME фірми MAN Diesel:

- 1, 5 – газотурбонагнітач; 2 – випускний колектор; 3 – керуючий клапан системи рециркуляції випускних газів високого тиску; 4 – скруббер; 6 – насос подачі прісної води в систему очищення та охолодження випускних газів;
7 – цистерна прісної води системи очищення та охолодження випускних газів;
9, 12 – охолоджувач наддувного повітря; 10 – судовий дизель;
11 – продувний ресивер; T, K – газова турбіна та повітряний компресор газотурбонагнітачів

Система працює в такий спосіб. Випускні гази з циліндрів дизеля 10 надходять у загальний випускний колектор 2 і далі до газотурбонагнетачів 1 і 5, після чого через газовипускную трубу видаляються в атмосферу. Газотурбонагнітачі 1 і 5 забирають повітря з машинного відділення та після стиснення спрямовують його через охолоджувачі 9 і 12 в повітряний (продувний) ресивер 11. При цьому газотурбонагнітач 5 обладнаний системою рециркуляції випускних газів високого тиску, до складу якої входять керуючий клапан 3, скруббер очищення газів 4, цистерна 7 прісної води системи очищення та охолодження випускних газів та насос 6 подачі прісної води в систему очищення та охолодження випускних газів.

Під час експлуатації системи рециркуляції випускних газів високого тиску їх кількість, що повертається через систему очищення до продувного ресиверу та циліндрів дизеля, регулюється клапаном 3. Випускні гази очищуються і попередньо охолоджуються в скруббері 4, після чого додатковим нагнітачем 8 подаються

на змішування з повітрям (що надходить з повітряного компресору газотурбонагнітувача 5) і далі прямують до продувального ресиверу 11.

Основною метою дослідження було визначення впливу системи HP-EGR на екологічні показники роботи суднового дизеля 8G60ME MAN Diesel, зокрема на рівень емісії оксидів азоту NO_x . Концентрація оксидів азоту вимірювалась у газо-випускній магістралі дизеля на відстані, що перебільшувала 10 м від виходу газів із газотурбонагнітача, що відповідало вимогам Технічного кодексу з NO_x . Вимірювання виконувались лише на сталих режимах роботи, що відповідали 60 %, 70 %, 80 % та 90 % від номінального навантаження. При цьому на кожному з режимів ступень рециркуляції поступово змінювався та становив 5 %, 10 %, 15 % та 20 %. На кожному з режимів дослідження починалися з вимірювання концентрації NO_x за умови роботи дизеля без використання системи HP-EGR ($EGR=0\%$). Навігаційні переходи дозволяли виконувати дослідження на кожному з режимів протягом 1,5–2,0 годин, що забезпечувало стабільність всіх контрольованих показників – частоти обертання та потужності дизеля, концентрації оксидів азоту у випускних газах, а також їх температури. Під час дослідження на кожному з режимів підтримувались постійними значення температури охолоджуючої води та змащувального мастила, а також фази паливоподачі та випуску газів. Результати досліджень з визначення зміни кількісних показників емісії оксидів азоту для різних умов проведення експерименту відображені на рис. 2.

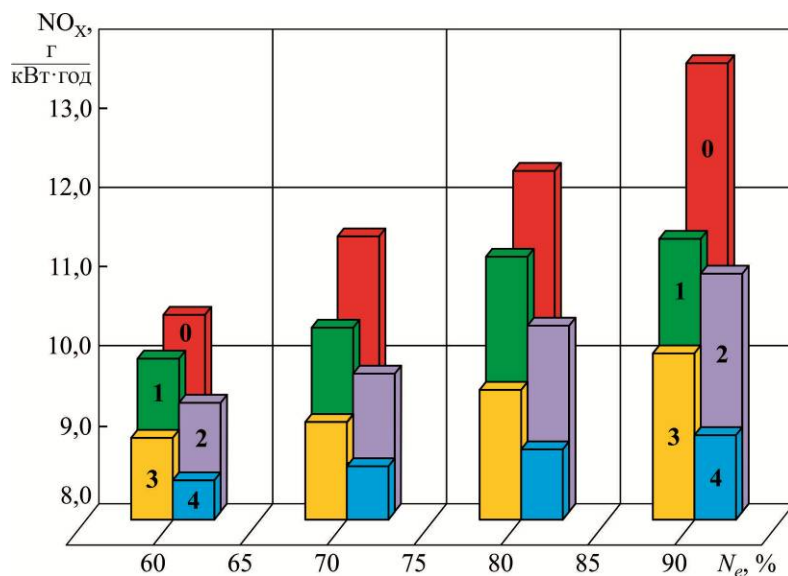


Рис. 2. Зміна концентрації оксидів азоту NO_x $z/(кВт\cdot год)$ у випускних газах дизеля 8G60ME MAN Diesel для різного ступеня рециркуляції:
0 – робота без рециркуляції, $EGR=0\%$; 1 – $EGR=5\%$; 2 – $EGR=10\%$;
3 – $EGR=15\%$; 4 – $EGR=20\%$

$$\Delta NO_x = \frac{NO_x^0 - NO_x^i}{NO_x^0} \cdot 100, \%$$

виконувалось визначення відносного зменшення емісії оксидів азоту NO_x . При цьому як NO_x^0 приймалась концентрація оксидів азоту у випадку, коли $\text{EGR}=0\%$; як NO_x^i – концентрація оксидів азоту для інших значень ступеня рециркуляції EGR (5 %, 10 %, 15 %, 20 %). За отриманими при цьому значеннями побудована діаграма (рис. 3).

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

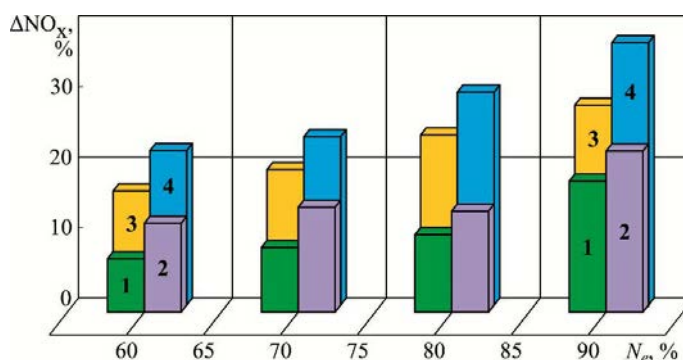


Рис. 3. Відносне зменшення емісії оксидів азоту NO_x з випускними газами дизеля 8G60ME MAN Diesel для різного ступеня рециркуляції:
1 – $\text{EGR}=5\%$; 2 – $\text{EGR}=10\%$; 3 – $\text{EGR}=15\%$; 4 – $\text{EGR}=20\%$

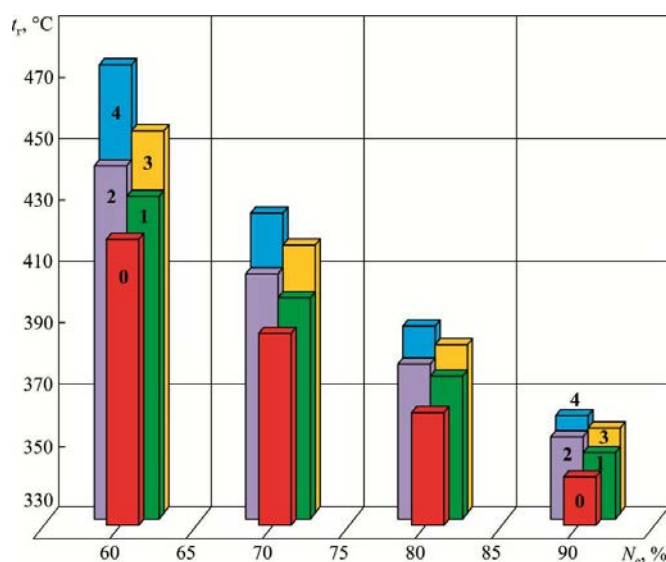


Рис. 4. Зміна температури випускних газів t_g , °C дизеля 8G60ME MAN Diesel для різного ступеня рециркуляції, %:
0 – робота без рециркуляції, $\text{EGR}=0\%$; 1 – $\text{EGR}=5\%$; 2 – $\text{EGR}=10\%$;
3 – $\text{EGR}=15\%$; 4 – $\text{EGR}=20\%$

Висновки. Необхідність забезпечення екологічних параметрів роботи суднових дизелів (зокрема, емісії NO_x з випускними газами) змушує використовувати додаткові технологічні рішення. Одним із таких варіантів є комплектація суднових дизелів системами рециркуляції випускних газів високого тиску HP-EGR, що забезпечують примусову подачу в циліндр частини випускних газів із газовипускної системи.

Під час проведення експериментів на судовому малообертовому дизелі 8G60ME MAN Diesel встановлено, що зміна ступеня рециркуляції випускних газів у діапазоні 5–20 % забезпечує зниження концентрації оксидів азоту NO_x у випускних газах відповідно на 5,7–38,5 % залежно від навантаження дизеля, яке в експериментах змінювалися в інтервалі $N_e = (0,6 \dots 0,9) N_{e\text{ном}}$. Причому найбільші значення зниження концентрації оксидів азоту NO_x у випускних газах відповідають інтервалу навантажень $(0,8 \dots 0,9) N_{e\text{ном}}$, тобто найпоширенішим з експлуатаційних режимів роботи дизелів, що використовуються як головні.

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

ЛІТЕРАТУРА

1. Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Tkachenko, I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2022. Вип. 45. С. 5–16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
2. 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. <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.
3. Сагін, С.В., Мадей, В.В., Сагін, С.С., Чимшир, В.І., Разінкін, Р.О. Аналіз екологічної стійкості та енергетичної ефективності використання скрубєрного очищення випускних газів дизелів суден морського транспорту. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2023. Вип. 47. С. 157–171.
4. Sagin, A.S., Zablotskyi, Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. 2021. № 7–8. P. 14–17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
5. Сагін, С.В., Куропятник, О.А. Використання системи рециркуляції випускних газів високого тиску для забезпечення екологічних показників суднових дизелів. *Матеріали VI міжнародної морської науково-практичної конференції кафедри СЕУ і ТЕ ОНМУ «Marine Power Plants & Operation MPP&O-2025»*. 2025. <https://2025.depas.od.ua>.

6. 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.
7. Petrychenko, O., Levinskyi, M., Prytula, D., Vynohradova, A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects. *Transport Systems and Technologies*. 2023. № 41. P. 96–106.
8. Varbanets, R., Shumylo, O., Marchenko, A., Minchev, D., Kyrnats, V., Zalozh, V., Aleksandrovska, N., Brusnyk, R., Volovyk, K. Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines. *Polish maritime research*. 2022. № 29(4). P. 88–96. <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
9. 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. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
10. 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>.
11. 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 p. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.
12. 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. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
13. Neumann, S., Varbanets, R., Minchev, D., Malchevsky, V., Zalozh, V. Vibrodiagnostics of marine diesel engines in IMES GmbH systems. *Ships and Offshore Structures*. 2022. № 18(11). P. 1535–1546. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2128558>.
14. Заблоцький, Ю.В. Підвищення економічності роботи суднових дизелів. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 40. С. 12–16. DOI: 10.31653/smf340.2020.12-16.
15. Petrychenko, O., Levinskyi, M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport. *Transport Systems and Technologies*. 2024. № 43. P. 21–36.
16. Сагін, С.С., Сагін, С.В. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден. *Водний транспорт* : збірник наукових праць. 2024. Вип. 1(39). С. 215–225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
17. Сагін, С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2018. Вип. 38. С. 132–142.

18. 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.
19. Заблоцький, Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок. *Вісник Одеського національного морського університету*. 2020. №2(62). С. 106–119. DOI: 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.
20. Сагін, С.В., Столярик, Т.О. Динаміка суднових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками. *Автоматизація суднових технічних засобів* : збірник наукових праць. 2021. Вип. 27. С. 108–119.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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: 10.31653/smf44.2022.132-141.
25. 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 : 10.31653/smf340.2020.49-54.
26. 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
27. 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: 10.31653/smf343.2021. 5-17.
28. 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.
29. Зверьков, Д.О., Сагін, С.В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях. *Суднові енергетичні установки* : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 41. С. 20–25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.

30. 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. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

REFERENCES

1. Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Tkachenko, I. (2022). Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships. *Ship power plants*, 45, 5–16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
2. Varbanets, R., Fomin, O., Píštěk, V., Klymenko, V., Minchev, D., Khrulev, A., Zalozh, V., Kučera, P. (2021). Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(3), 321. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.
3. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, S.S., Chimshir, V.I., Razinkin, R.O. (2023). Analiz ekologichnoi stiičnosti ta energetichnoi efektyvnosti vicoristanya scrubernogo ochishenya vipusknich gaziv dizeliv sudden morskogo transportu. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 47, 157–171.
4. Sagin, A.S., Zablotskyi, Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels. (2021). *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 7–8, 14–17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
5. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. (2025). Viktoristanie sistemi recirkulyacii vipusknih gaziv nizkogo tisku dlya zabezpechenya ekologichnih pokaznikiv sudnovih dizelei. *Materials of the International Conference «Marine Power Plants & Operation MPP&O-2025»*. 2025. <https://2025.depas.od.ua>.
6. Poberezhniy, R.V., Sagin, S.V. Zabezpechenya ekologichnykh pokaznikiv dizeliv suden richkovogo ta morskogo transport. (2020). *Sudnovi energetichni ustanovki*, 41, 5–9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
7. Petrychenko, O., Levinskyi, M., Prytula, D., Vynohradova, A. (2023). Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects. *Transport Systems and Technologies*, 41, 96–106.
8. Varbanets, R., Shumylo, O., Marchenko, A., Minchev, D., Kyrnats, V., Zalozh, V., Aleksandrovska, N., Brusnyk, R., Volovyk, K. (2022). Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines. *Polish maritime research*, 29(4), 88–96. <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>.
9. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines. (2021). *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 7–8, 36–43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
10. 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>.

11. Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Matieiko, O., Razinkin, R., Stoliaryk, T., Volkov O. (2024). Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12, 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.
12. Petrychenko, O., Levinskyi, M., Goolak, S., Lukoševičius, V. (2025). Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport. *Sustainability*, 17, 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
13. Neumann, S., Varbanets, R., Minchev, D., Malchevsky, V., Zalozh, V. (2022). Vibrodiagnostics of marine diesel engines in IMES GmbH systems. *Ships and Offshore Structures*, 18(11), 1535–1546. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2128558>.
14. Zablotskyi, Yu.V. (2020). Pidvishenya ekonomichnosti roboti sudnovih dizeliv. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 40, 12–16. DOI: 10.31653/smf340.2020.12-16.
15. 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.
16. Sagin, S.S., Sagin, S.V. (2024). Vicoristanya shtuchnogo intelektu v situaciyah nadmirnogo zblizhenya suden. *Vodnii transport*, 1(39), 215–225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
17. Sagin, S.V. (2018). Zнизhenya energetichnih vtrat v precizionih parah palivnoi aparaturi sudnovich dizeliv. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 38, 132–142.
18. Sagin, S.V., Suvorov, P.S., Bondar, S.A. (2023). Rozrobka metodu ocinki rizikiv vineknnya avariinih podii pid chas eksplyatacii dizeliv morskih suden. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 47, 122–130. doi: 10.31653/smf47.2023.122-130.
19. Zablotskyi, Yu.V. (2020). Pidvishenya palivnoi ekonomichnosti sudnovih dizelnih ustanovok. *Visnik Odeskogo nacionalnogo morskogo universitetu*, 2, 106–119. DOI: 10.47049/2226-1893-2020-1-106-119.
20. Sagin, S.V., Stolyaryk, T.O. (2021). Dinamika sudnovih dizeliv pid chas vikoristanya motornich mastil z rizznimi structurnimi harakteristikami. *Avtomatizaciya sudnovih tehnicnih zasobiv*, 27, 108–119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
21. Sagin, S.V., Madey, V.V., Sagin, A.S. (2021). Robota sudnovogo dizelya na biodizelnom palivi. *Avtomatizaciya sudnovih tehnicnih zasobiv*, 27, 93–107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.
22. Sagin, S.V., Bondar, S.A. (2023). Metod poperedzhenya avariinih situacii pid chas eksplyatacii sudnovih dizeliv za analizom potocu vidmov iogo osnovnih vuzliv. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 46, 101–109. doi: 10.31653/smf46.2023.101-109.
23. Sagin, S.V., Sagin, A.S. (2023). Control ta diagnostuvanya nadiinosti ta ekonomichnosti dizeliv morskih ta richkovih zasobiv transportu. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 46, 118–131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.

24. Sagin, S.V., Poberezhniy, R.V. Analiz osnovnich sposobiv znizhenya emisii oksidiv azotu dizeliv suden morskogo ta vnutrishnego vodnogo transportu. (2022). *Sudnovi energetichni ustanovki*, 44, 132–141. doi: 10.31653/smf44.2022.132-141.
25. Rusnak, D.Y., Sagin, S.V. (2020). Zabezpechena ecologichnich vumog pri ultrazvukovii desulphurizacii vuglevodnich paliv. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 40, 49–54. DOI : 10.31653/smf340.2020.49-54.
26. 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.
27. Zablotskyi, Yu.V., Sagin, A.S. (2021). Applying of fuel additives in marine diesel engines. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 43, 5–17. doi: 10.31653/smf343.2021. 5-17.
28. Marchenko, O.O., Sagin, S.V. (2020). Vdoskonalenya procesu ochishenya sudnovih vazhkih paliv. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 41, 10–14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
29. Zverkov, D.O., Sagin, S.V. (2020). Znizhenya mechanichnich vtrat u sudnovich dizelyach. *Sudnovi energetichni ustanovki*, 41, 20–25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.
30. Sagin, S.V., Kuropyatnyk, O.A. (2021). Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 7–8, 36–43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656.615.073:005.8

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2025.2-25.08>

ПІДВИЩЕННЯ ОПЕРАТИВНОСТІ МОРСЬКОГО АГЕНТУВАННЯ ЧЕРЕЗ ВИКОРИСТАННЯ МЕРЕЖЕВОГО ПЛАНУВАННЯ

М.С. Вільшанюк

ст. викладач кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-5396-6691

Анотація

Вступ. Одним із важливіших елементів ефективної організації роботи порту під час заходу судна є морське агентування: це забезпечує взаємодію між усіма учасниками перевезення: судновласником, екіпажем, портовими структурами та державними контролюючими органами. Своєчасне та якісне виконання агентом своїх функцій має суттєвий вплив на швидкість і якість обробки суден у порту. У зв'язку з ускладненням процесу доставки вантажу в період обробки судна в порту та актуальним запитом щодо автоматизації з'являється потреба у впровадженні сучасних методів управління, зокрема мережевого планування. **Мета.** Метою дослідження є підвищення ефективності роботи агента в період обслуговування судна в порту за допомогою використання мережевого планування, тобто розробка мережевої моделі процесу обслуговування агентом судна для визначення критичних операцій та урахування часу виконання і виявлення резервів, а також обґрунтування доцільності впровадження цифрових інструментів для підтримки агентської діяльності. **Результати.** Після проведення аналізу та розрахунків було побудовано структуровану мережеву модель, яка включає усі основні етапи агентського обслуговування судна: від отримання повідомлення про планове прибуття судна до завершення оформлення документації після відходу судна. У результаті розрахунків було визначено критичний шлях, що становить 34 години, розраховано резерви часу для деяких операцій. Також запропоновано практичні рекомендації щодо підвищення ефективності процесу, включаючи впровадження цифрових систем обробки документів, використання стандартних процедур та штучного інтелекту для прогнозування можливих затримок. **Висновки.** Метод мережевого планування дозволяє спрогнозувати процес обслуговування судна в порту та підвищити ефективність роботи морського агента. Його застосування знижує ризик помилок, скорочує час обробки суден і підвищує загальний рівень оперативної роботи суден і портів. Результати дослідження можуть бути корисними для практичного використання в українських портах з урахуванням специфіки вітчизняної нормативно-правової бази.

Ключові слова: морський агент, морський порт, мережеве планування, критичний шлях, судно, обслуговування суден.

ENHANCING THE EFFICIENCY OF MARITIME AGENCY OPERATIONS
THROUGH THE USE OF NETWORK PLANNING

M.S. Vilshaniuk

Senior Lecturer at the Department "Fleet Operation and Maritime Transportation Technology",
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-5396-6691

Summary

Introduction. One of the most important elements of efficient port operations is maritime agency, which ensures interaction between all parties involved in the transport: shipowner, crew, port authorities and state regulatory bodies. The timely and high-quality performance of the agent's functions has a significant impact on the speed and quality of ship handling in the port. Due to the complication of the cargo delivery process during the period of ship handling in the port and the current demand for automation, there is a need to implement modern management methods, in particular, network planning. **Purpose.** The aim of the study is to increase the efficiency of the agent's work during the period of ship handling in the port by using network planning, i.e. to develop a network model of the process of ship handling by the agent to identify critical operations and take into account the execution time and identify reserves, as well as to justify the feasibility of introducing digital tools to support agent activities. **Results.** After the analysis and calculations, a structured network model was built, which includes all the main stages of ship agent services: from receiving a notification of the scheduled arrival of the vessel to completing the documentation after the vessel's departure. As a result of the calculations, the critical path of 34 hours was determined, and time reserves for some operations were calculated. The author also offers practical recommendations for improving the efficiency of the process, including the introduction of digital document processing systems, the use of standardized procedures and artificial intelligence to predict possible delays. **Conclusions.** The network planning method makes it possible to predict the process of servicing a vessel in the port and allows to increase the efficiency of the maritime agent. Its application reduces the risk of errors, shortens the time of vessel handling and increases the overall level of operational performance of ships and ports. The results of the study may be useful for practical use in Ukrainian ports, taking into account the specifics of the domestic regulatory framework.

Key words: maritime agent, seaport, network planning, critical path, ship, ship handling.

Вступ. На морському транспорті посередницька діяльність має велике значення. Посередники зв'язують між собою основних учасників доставки вантажу, що значно спрощує процес. Одними з важливіших представників цієї галузі є морські агенти, які здійснюють агентування суден – особливий вид взаємодії учасників перевезення в морському середовищі. В обов'язки агента входить як організаційно-технічна допомога екіпажу під час перебування в порту, так і представництво інтересів судновласника на договірних умовах.

У жорстких умовах конкуренції між судноплавними компаніями покращення рівня послуг агентів є важливим фактором, що впливає на роботу флоту. Ефективне

агентське обслуговування сприяє зменшенню часу стоянки судна в порту, підвищенню ефективності транспортних процесів і зниженню загальних витрат судовласника.

В умовах активного розвитку морських перевезень та зростання вимог щодо оперативного обслуговування в порту діяльність морського агента має велике значення. Це пояснюється виконанням агентом функцій координатора між судовласником, портом, контролюючими органами та екіпажем судна. Неефективне планування окремих етапів агентської роботи може призвести до затримок та збитків. Для зменшення ризиків та втрат часу пропонується застосовувати метод мережевого планування.

Постановка проблеми. В умовах інтенсивного розвитку світових транспортних процесів роль морського агента як провідного посередника між судовласником та портовими структурами значно збільшилась. Незважаючи на технічний прогрес, багато агентських операцій у морських портах України залишаються роз'єднаними, виконуються вручну або за процедурами, що не відповідають часу. Це може призвести до затримок, додаткових витрат і зниження конкурентоспроможності портів. На ситуацію також впливає недостатній рівень цифровізації документообігу, відсутність єдиних стандартів взаємодії між учасниками процесу та обмежене застосування сучасних методів управління процесом. У зв'язку з цим виникає необхідність впровадження ефективних методів моделювання та підвищення ефективності діяльності морських агентів, зокрема застосування методу мережевого планування. Цей метод дозволяє більш точно оцінити тривалість окремих етапів та виявити критичні точки впливу на загальний процес обслуговування суден.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання організації продуктивної роботи агента з обслуговування суден розглядалося в багатьох працях українських та зарубіжних дослідників. Зокрема, в статті [1] акцентовано увагу на формалізації процесу агентського обслуговування за допомогою операторів темпоральної логіки. У роботах [2–4] вивчаються питання автоматизованої інформаційної системи підтримки морського агента та концепції єдиного інформаційного простору на морському транспорті.

Методи мережевого планування в логістиці були проаналізовані в працях [5], де запропоновано ряд адаптованих до морських перевезень моделей, що дозволяють виявити критичні етапи логістичних процесів. У роботі [7] наголошують на важливості цифрової трансформації портів та впровадженні цифрових платформ для взаємодії між агентами, портовими адміністраціями та державними органами контролю.

Серед зарубіжних досліджень варто відзначити праці [10], які досліджують структурні зміни в логістиці та виклики для портових адміністрацій, а також заслуговує уваги робота [8], де представлений системний аналіз транспортної географії в умовах цифрової економіки. Вагомий внесок у розуміння ролі цифрових інструментів у логістиці зроблено у розвідці [9].

Незважаючи на наявні здобутки, питання практичного застосування методів мережевого планування саме в діяльності морського агента залишається недостатньо розробленим. Це зумовлює необхідність вирішення цього питання за

допомогою моделі, яка б відповідала сучасним умовам функціонування та специфіці агентського обслуговування суден.

Мета статті – підвищення ефективності роботи морського агента під час обслуговування судна в порту за допомогою використання методу мережевого планування, тобто розробка практичної мережевої моделі, яка відображає повний цикл агентського обслуговування судна з урахуванням взаємозв'язків між операціями, критичних шляхів та потенційних резервів часу. Дослідження також спрямоване на аналіз можливості впровадження цифрових інструментів в агентську діяльність для забезпечення її прозорості та ефективності.

Виклад основного матеріалу. В умовах мінімізації часу перебування судна в порту особливого значення набуває застосування методів планування під час агентського обслуговування судна в порту. У логістичному ланцюзі порт є одним із найважливіших елементів, що суттєво впливає на час доставки. І цей фактор особливо актуальний для українських портів, оскільки період обробки вантажу і судна в порту залежить від багатьох причин і може перевищувати середньостатистичні значення цієї величини портів-конкурентів. Причин може бути кілька. Однією з них є неузгодженість дій під час організації обробки судна в період стоянки. Сюди можна віднести неефективне планування операцій і недостатню автоматизацію процесу під час заходу судна. Таким чином, скорочення часу перебування судна в порту є актуальним питанням.

У дослідженні використано метод мережевого планування для моделювання процесу агентського обслуговування судна в умовах порту. Мережеві моделі дозволяють відображати сукупність операцій, необхідних для повного обслуговування судна, а також логічні та часові зв'язки між ними. Основними параметрами таких моделей є критичний шлях, резерви часу операцій та маршрутів. Було зібрано та узагальнено емпіричні дані з діяльності морських агентів в українських портах. Основну увагу приділено операціям, які найбільше впливають на загальний час обслуговування судна.

У межах дослідження змодельований повний цикл агентського обслуговування судна з урахуванням специфіки роботи українських портів. Для кожної операції було визначено такі параметри: дата початку, тривалість та залежність від інших операцій.

Побудований цикл дозволяє в реальному часі:

- отримувати загальну картину послідовності дій;
- виявляти проблемні місця в процесі агентських операцій в порту;
- проводити моніторинг та контроль виконання робіт;
- своєчасно реагувати на затримки або відхилення від графіку.

Особливу увагу було приділено визначенню критичного шляху, тобто послідовності дій, від яких безпосередньо залежить тривалість процесу обслуговування.

Побудова мережевої моделі здійснюється на основі попередньо структурованого переліку функцій агента.

Під час опрацювання було розглянуто детальну мережеву модель агентських операцій у порту. Вона складається з 16 операцій:

1. Отримання нотіса про прихід судна.
2. Реєстрація інформації в судовій справі.
3. Збір первинної інформації.
4. Повідомлення контролюючих органів.

5. Підготовка оформлення екіпажу.
6. Координація лоцманського та буксирного проведення.
7. Номінація причалу.
8. Контроль вантажних операцій.
9. Оформлення суднових документів.
10. Передача вантажної декларації.
11. Координація з митницею.
12. Оформлення ветеринарного, екологічного і фітосанітарного видів контролю.
13. Завершення вантажних операцій.
14. Підготовка до відходу.
15. Завантаження фінального пакета документів.
16. Завершення агентського супроводу.

Усі операції було систематизовано та віднесено до типового процесу, який можна представити в узагальненому вигляді роботи агента. Такий типовий процес агентського обслуговування занесено в таблицю 1.

Таблиця 1

Операції процесу агентського обслуговування судна в порту

№	Операція	Опис
V0	Отримання повідомлення від судновласника	Визначення часу прибуття
V1	Підготовка до прибуття	Збір даних, попереднє планування
V2	Номінація причалу	Узгодження з диспетчером порту
V3	Координація лоцманської / буксирної проводки	Взаємодія з портовими службами
V4	Оформлення приходу	Подання документів
V5	Контроль вантажних операцій	Координація екіпажу та терміналу
V6	Перевірка готовності до відходу	Завершення всіх операцій
V7	Оформлення відходу	Отримання дозволу на вихід
V8	Закриття документації	Розрахунки з портом

На основі вивчення процесу агентського супроводу було визначено тривалість операцій – ці дані занесено в таблицю 2. На основі логіки виконання операцій побудовано мережеву діаграму з отриманою тривалістю кожної з операцій.

Таблиця 2

Тривалість операцій

Код	Операція	Тривалість (год.)
V0	Повідомлення	2
V1	Підготовка	3
V2	Бронювання причалу	2
V3	Оформлення приходу	4
V4	Лоцманська/буксирна проводка	6
V5	Вантажні операції	8
V6	Перевірка	3
V7	Оформлення відходу	4
V8	Закриття	2

Далі за результатами СРМ-аналізу створено таблицю із зазначенням ранніх та пізніх термінів виконання операцій (табл. 3)

Таблиця 3

Ранні та пізні терміни

Код	Ранній початок	Раннє завершення	Пізній початок	Пізнє завершення	Резерв
B0	0	2	0	2	0
B1	2	5	2	5	0
B2	5	7	5	7	0
B3	7	11	7	11	0
B4	11	17	11	17	0
B5	17	25	17	25	0
B6	25	28	25	28	0
B7	28	32	28	32	0
B8	32	34	32	34	0

Після проведення необхідних розрахунків отримуємо критичний шлях:

$B0 \rightarrow B1 \rightarrow B2 \rightarrow B3 \rightarrow B4 \rightarrow B5 \rightarrow B6 \rightarrow B7 \rightarrow B8$.

Діаграма PERT дозволила виявити критичний шлях тривалістю 34 години. За допомогою розрахунків визначено резерви для таких операцій, як підготовка оформлення екіпажу (2 години), координація з митницею (3 години) та оформлення ветеринарного контролю (1 година).

Було виявлено, що критичний шлях проходить через такі ключові етапи: повідомлення органів контролю \rightarrow забезпечення лоцмана \rightarrow контроль вантажних операцій \rightarrow митне оформлення \rightarrow завершення агентського супроводу.

Розрахунки супроводжуються діаграмою мережі та таблицею тривалості кожної операції, з огляду на оптимістичну, песимістичну та ймовірну оцінки за методикою PERT.

Мережева модель дає змогу детально проаналізувати кожен етап агентського супроводу, виявити операції з найбільшим впливом на тривалість усієї процедури. Зокрема, затримки на етапах оформлення документів та організації портових послуг є найбільш критичними. Для підвищення ефективності пропонується:

- впровадити цифрову платформу для електронного документообігу;
- уніфікувати шаблони визначених дій агента;
- автоматизувати погодження з портовими службами.

Варто при цьому зазначити, що в деяких портах України вводилася Інформаційна система портового співтовариства, але на тепер вона не працює.

Впровадження систем електронного документообігу має декілька переваг: дозволяє зменшити час обробки документів, підвищити прозорість процедур та мінімізувати людський фактор. Ще варто зазначити, що стандартизація цифрових форм дозволяє пришвидшити погодження між сторонами процесу. Інтелектуальні системи можуть аналізувати очікувані дані про прибуття суден, погодні умови, завантаженість портових об'єктів та прогнозувати ризики затримок. Ці дії дозволяють агенту ефективно здійснити операції з обслуговування судна.

Для покращення роботи агента з новітніми інструментами пропонується впровадження програм безперервного його навчання. Сьогоднішній розвиток цифрових систем потребує від кадрів постійного навчання та самовдосконалення.

Висновки. Побудування мережевого графіка є ефективним інструментом для покращення процесів агентського обслуговування суден. Застосування методу мережевого планування дозволяє зменшити час стоянки, покращити взаємодію з портовими структурами, виявити резерви часу та підвищити ефективність обслуговування. З огляду на специфіку українських портів треба зазначити, що за певними операціями складно запланувати точний час виконання, наприклад оформлення приходу / відходу судна, митне оформлення та виникнення позаштатних операцій під час вантажних робіт. Тому ці операції віднесено до критичних, для них визначено резерви часу. Використання методу мережевого планування із залученням портових служб дозволить скоротити час знаходження судна в порту. Додатково пропонується впровадження цифрових технологій, автоматизованих систем та прогнозного аналізу, щоб створити умови для розвитку адаптивної та агентської системи, яка оперативно реагує на зміни. Мережеве планування у сфері морського агентування дозволяє визначити моменти зниження продуктивності роботи, покращити координацію дій та знизити ризики. Одночасне впровадження цифрових платформ і автоматизованих систем документації прискорює агентські процеси та підвищує конкурентоспроможність портів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дрожжин О.Л., Коскіна Ю.О. Моделювання процесу агентського обслуговування морських суден. *Наукоємні технології ("Science-Based Technologies")*. 2024. № 1 (61). С. 76–84. DOI: 0.18372/2310-5461.61.18290.
2. Петров І.М., Рудніченко М.Д. Особливості використання концепції єдиного інформаційного простору для потреб сервісних ергатичних систем на морському транспорті. *Science and technology of the present time: priority development directions of Ukraine and Poland*. 2018. № 1. С. 106–108.
3. Петров І.М., Вичужанін В.В., Рудніченко М.Д., Шибаета Н.О., Шибаета Д.С. Проектування автоматизованої інформаційної системи підтримки діяльності морського агента в сервісних ергатичних системах. *Вісник сучасних інформаційних технологій*. 2018. № 1 (1). С. 36–48.
4. Петров І.М. Модель оптимізації управління запасами на консигнаційних складах в сервісних ергатичних системах на морському транспорті. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2016. № 2 (15). С. 57–64.
5. Лапкина І.О., Павловська Л.А., Болдирєва Т.В., Шутенко Т.М. Проектний аналіз: теоретичні основи оцінки проектів на морському транспорті : навчальний посібник / за заг. ред. І.О. Лапкиної. Одеса : Фенікс, 2008. 416 с.
6. ISO 21500:2021. Guidance on project management. International Organization for Standardization.
7. Kerzner H. Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling. Wiley, 2017. 1296 p.

8. Notteboom T. The time factor in liner shipping services. *Maritime Economics & Logistics*. 2006. Vol. 8. P. 19–39.
9. UNCTAD. Review of Maritime Transport 2023 / United Nations Conference on Trade and Development. 2023.
10. Slack B., Comtois C., McCalla R. Ports and the Environment. *Maritime Policy & Management*. 2002. Vol. 29(3). P. 241–260.
11. Управління проектами: практичні аспекти реалізації стратегій регіонального розвитку : навчальний посібник / В.А. Рач, О.В. Россошанська, О.М. Медведєва ; за ред. В.А. Рача. Київ : «К.І.С.», 2010. 276 с.
12. Русанова С.С. Прикладні імперативи управління проектами в портовій логістиці. Частина I. Планування проекту створення логістичного центру. *Наукові вісті Дніпровського університету*. 2023. № 24. С. 45–52.
13. Шибасєв, О., Берневек, Т., & Вільшанюк, М. Вибір та обґрунтування шипчандлерських компаній для обслуговування суден контейнеровозів. *Вісник Одеського національного морського університету*. 2023. № 71. С. 172–183.
14. Москвіченко І.М., Стаднік В.Г. Логістичний аутсорсинг функцій лінійного агента в глобальні центри обслуговування бізнесу. *Науково-виробничий журнал*. 2020. № 2 (113). С. 139–146.
15. Мурад'ян А. О. Інноваційні технології в управлінні роботою портових операторів. *Вісник Одеського національного морського університету*. 2022. № 67. С. 124–134.
16. Розуміння послуг морського агентства з міжнародних вантажних перевезень. URL: <https://www.wingspeedshipping.com/uk/Understanding-Sea-Shipping-Agent-Services-for-International-Freight> (дата звернення: 14.04.2025).
17. Wijnolst N., Wergeland T. Shipping Innovation. IOS Press, 2009. 420 p.

REFERENCES

1. Drozhzhin O.L., Koskina Yu.O. (2024). Simulation of sea ships agency service process. [Modeliuvannia procesu agentskoho obsluhovuvannia morskikh suden]. *Science-Based Technologies*, 1 (61), 76–84. DOI: 0.18372/2310-5461.61.18290 [in Ukrainian].
2. Petrov I.M., Rudnichenko M.D. (2018). Peculiarities of using the concept of a single information space for the needs of service ergonomic systems in maritime transport. [Osoblyvosti vykoristannya koncepcii yedynoho informacijnoho prostoru dlia potreb servisnih erhatichnyh system na morskomu transporti]. *SCIENCE AND TECHNOLOGY OF THE PRESENT TIME: PRIORITY DEVELOPMENT DIRECTIONS OF UKRAINE AND POLAND*, 1, 106–108 [in Ukrainian].
3. Petrov I.M., Vychuzhanin V.V., Rudnichenko M.D., Shybaeva N.O., Shybaev D.S. (2018). Designing an automated information system to support the activities of a marine agent in service ergonomic systems. [Proektuvannia avtomatyzovanoi informatsiinoi systemy pidtrymky diialnosti morskoho ahenta v servisnykh erhatychnykh systemakh]. *Bulletin of modern information technologies*. 1 (1). 36–48 [in Ukrainian].
4. Petrov I.M. (2016). Model of optimisation of stock management in consignment warehouses in service ergonomic systems in maritime transport. [Scientific Model optymizatsii upravlinnia zapasamy na

- konsyhnatsiinykh skladakh v servisnykh erhatychnykh systemakh na morskomu transporti]. Bulletin of Kherson State Maritime Academy, 2 (15), 57–64 [in Ukrainian].
5. Lapkyna I.O., Pavlovska L.A., Boldyrieva T.V., Shutenko T.M. (2008). Project analysis: theoretical foundations of project evaluation in maritime transport: Study guide / Edited by I.O. Lapkina. [Proektnyi analiz: teoretychni osnovy otsinky proektiv na morskomu transporti: Navchalnyi posibnyk / za zah. red. I.O. Lapkinoi]. Odesa : Phoenix, 416 p. [in Ukrainian].
 6. International Organization for Standardization (2021). ISO 21500:2021 – Guidance on project management.
 7. Kerzner, H. (2017). Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling. Wiley, 1296 p.
 8. Notteboom, T. (2006). The time factor in liner shipping services. Maritime Economics & Logistics, 8, 19–39.
 9. United Nations Conference on Trade and Development (2023). Review of Maritime Transport 2023.
 10. Slack, B., Comtois, C., & McCalla, R. (2002). Ports and the Environment. Maritime Policy & Management, 29(3), 241–260.
 11. Rach V.A. (2010). Project Management: Practical Aspects of Implementation of Regional Development Strategies: a textbook / V.A. Rach, O.V. Rossoshanska, O.M. Medvedeva; edited by V.A. Rach. [Upravlinnia proektamy: praktychni aspekty realizatsii stratehii rehionalnoho rozvytku: navchalnyi posibnyk / V.A. Rach, O.V. Rossoshanska, O.M. Medvedeva; za red. V.A. Racha]. Kyiv : K.I.S., 276 p. [in Ukrainian].
 12. Rusanova S.S. (2023). Applied imperatives of project management in port logistics. Part I. Planning a project to create a logistics centre. [Prykladni imperatyvy upravlinnia proiektamy v portovii lohistytsi. Chastyna I. Planuvannia proiektu stvorennia lohistychnoho tsentru]. Scientific news of Dahl University, 24, 45–52 [in Ukrainian].
 13. Shybaiev, O., Bernevek, T., & Vilshaniuk, M. (2023). Selection and Justification of Shipchandler Companies for Servicing Container Ships. [Vybir ta obgruntuvannia shypchalerskykh kompanii dlia obsluhovuvannia suden konteinerovoziv]. Bulletin of Odesa National Maritime University, 71, 172–183 [in Ukrainian].
 14. Moskvichenko I.M., Stadnik V.H. (2020). Logistics outsourcing of line agent functions to global business service centres. [Lohistychnyi autsorsynh funktsii liniinoho ahenta v hlobalni tsentry obsluhovuvannia biznesu. Naukovo-vyrobnychy zhurnal]. Scientific and production journal, 2(113), 139–146 [in Ukrainian].
 15. Muradian A. O. (2022). Innovative technologies in the management of port operators. [Innovatsiini tekhnolohii v upravlinni robotoiu portovykh operatoriv]. Bulletin of Odesa National Maritime University, 67, 124–134 [in Ukrainian].
 16. Rozuminnia posluh morskoho ahentstva z mizhnarodnykh vantazhnykh perevezen. URL: <https://www.wingspeedshipping.com/uk/Understanding-Sea-Shipping-Agent-Services-for-International-Freight> (data zvernennia: 14.04.2025).
 17. Wijnolst, N., & Wergeland, T. (2009). Shipping Innovation. IOS Press, 420 p.

**МОДЕЛЬ УЗГОДЖЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ
ПЕРЕВЕЗЕННЯ ЗБІЖЖЯ АВТОТРАНСПОРТНИМИ ЗАСОБАМИ
З ПОЛЯ ДО ТИМЧАСОВОГО ПУНКТУ ЗБЕРІГАННЯ**

О.А. Воронков¹, І.Л. Роговський²

¹Голова циклової комісії «Транспортні технології»,
Фаховий коледж інженерії, управління та землевпорядкування
Державного некомерційного підприємства «Державний університет
«Київський авіаційний інститут», Київ, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-0955-9081

²д. т. н., професор, завідувач кафедри «Технічний сервіс та інженерний менеджмент
імені М. П. Момотенка»,
Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-6957-1616

Анотація

Вступ. У багатьох роботах було отримано, що проблеми підвищення ефективності застосування в транспортних системах автотранспортних засобів, збереження збіжжя та приведення його в продукт вирішуються під час кампанії збору врожаю зернових сільськогосподарських культур. **Мета** полягає у формуванні методичних передумов обґрунтування моделі узгодження транспортних потоків перевезення збіжжя автотранспортними засобами з поля до тимчасового пункту зберігання. **Результати.** Було отримано, що на підставі виробничих можливостей, вартості збирання та перевезення зерна, пропускної спроможності пунктів зберігання існує можливість вирішення задачі визначення оптимальних планів збирання та розподілу транспортних потоків збіжжя серед тимчасових пунктів зберігання, за умови мінімізації суми витрат на збирання та транспортування зерна з урахуванням витрат зерна. Запропоновано, що пара об'єм перевезення обсягу сільськогосподарського збіжжя з поля за варіантом кампанії до пункту зберігання та інтенсивність застосування варіанту кампанії поля збирання сільськогосподарського збіжжя характеризує лише тоді виробничо-транспортний план, якщо існують чіткі умови. При цьому об'єм перевезення обсягу сільськогосподарського збіжжя з поля за варіантом кампанії до пункту зберігання описує компоненту виробничого плану, а інтенсивність застосування варіанту кампанії поля збирання сільськогосподарського збіжжя – транспортно-го плану. Доданки цільової функції представимо у виді таких рівнянь, що відображають відповідно виробничі та транспортні витрати з реалізації плану. Виробничо-транспортний план вважаємо допустимим, якщо він задовольняє чітким умовам і оптимальним, якщо, крім того, доставляє мінімум функції. Вирішення запропонованих виразів є рішення задачі часткового цілочисельного лінійного програмування і характеризується низкою специфічних особливостей. Алгоритм передбачає побудову послідовності таких виробничих планів, котрим сума виробничих і транспортних витрат мінімальна. Оскільки отриманий на першому

кроці виробничий план є найкращим з позиції витрат на виробництво продукції, поліпшення цієї суми можна досягти лише гірший виробничий план, але при цьому отримуючи велику економію на транспортних витратах. **Висновки.** У цій статті ми показуємо, що існують методичні передумови обґрунтування моделі узгодження транспортних потоків перевезення збіжжя автотранспортними засобами з поля до тимчасового пункту зберігання. Встановлено, що модель визначення обсягів транспортування обмолоченого зерна від комбайнів до пункту тимчасового зберігання з урахуванням втрат зерна при збиранні врожаю після оптимальних агротермінів розглядає операції збирання та транспортування зерна як єдиний неподільний процес і дозволяє, завдяки раціональному розподілу транспортних потоків зібраного зерна, зменшити втрати зерна при збиранні врожаю за обмеження оптимальних агротермінів.

Ключові слова: автотранспорт, збіжжя, модель, агропромисловий комплекс, транспортний потік.

MODEL OF COORDINATION OF TRANSPORT FLOWS OF GRAIN TRANSPORTATION BY VEHICLES FROM FIELD TO TEMPORARY STORAGE POINT

O.A. Voronkov¹, I.L. Rogovskii²

¹Chairman of the cycle commission of transport technologies,
Professional College of Engineering, Management and Land Management of the State
University of the State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine,
ORCID ID 0000-0003-0955-9081

²DS, Professor, Head of the Department of Technical Service
and Engineering Management named after M. P. Momotenko,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-6957-1616

Summary

Introduction. Most of the works have received that the problems of improving the efficiency of use in transport systems of vehicles, preserving grain and bringing it into the product are resolved during the campaign of harvesting grain crops. The **purpose** is to formulate methodological prerequisites for substantiating the model of coordination of transport flows of transportation of grain by motor vehicles from the field to a temporary storage point. **Results.** It was obtained that on basis of production opportunities, the cost of harvesting and transportation of grain, the capacity of storage points there is a possibility of solving the problem of determining the optimal plans of harvesting and distribution grain. It is proposed that the volume of transportation of agricultural grain from the field by the campaign to the storage point and the intensity of the variant of the campaign of the field of field harvesting field is characterized only when the production and transportation plan, if there are clear conditions. At the same time, the volume of agricultural grain transportation from the field by the campaign to the storage point describes the component of the production plan, and the intensity of using the variant of the campaign of the field of harvesting agricultural grain – a transport plan. The additions of the target function will be presented in the form of equations, which reflect accordingly production and transport costs for the implementation of the plan. The

production and transmission plan is considered acceptable if it satisfies clear conditions and optimal, if, in addition, delivers a minimum of function. The solution of the proposed expressions is to solve the problem of partial integer linear programming and is characterized by a number of specific features. The algorithm involves the construction of such production plans, which is minimal. Since the production plan obtained in the first step is the best from the standpoint of production costs, only a worse production plan can be improved, but getting a lot of savings on transport costs can be achieved.

Conclusions. *In this article, we show that there are methodological preconditions for justifying the model of coordination of transport flows of transportation of grain by motor vehicles from the field to a temporary storage point. It is established that the model for determining the volume of transportation of threshed grain from combines to a temporary storage point, taking into account the loss of grain when harvesting after optimal agro -termini, considers the operations of harvesting and transportation of grain as a single indivisible process, and allows, thanks to the rational distribution of transport flows of harvesting.*

Key words: *vehicle, grain, model, agro-industrial complex, traffic flow.*

Вступ. Роль автомобільного транспорту в сільськогосподарському виробництві настільки висока, що частково вирішити проблему негативного антропогенного впливу транспортних засобів можливо лише внаслідок запровадження нових методів організації кампанії збору врожаю [1]. Автоперевезення – це зв’язок у єдиному технологічному ланцюжку сільськогосподарського виробництва, який домінуюче забезпечує матеріальні потоки різних врожаїв сільськогосподарських культур на всіх етапах та етапах його виробничого циклу [2]. При цьому автотранспортні засоби є інтегратором виробничої діяльності аграрних підприємств з виробництва, переробки та обслуговування сільськогосподарського виробництва [3]. Вважається обґрунтованим формування проблеми узгодження транспортних потоків перевезення збіжжя автотранспортними засобами з поля до тимчасового пункту зберігання.

Постановка проблеми. Для вирішення проблеми підвищення ефективності застосування в транспортних системах автотранспортних засобів [4], збереження збіжжя та приведення його в продукт під час кампанії збору врожаю для транспортування зерна [5] ми пропонуємо використовувати двоступеневий контур транспорту з поля до споживача, представлений на рис. 1. Згідно з цим (рис. 1) споживач розглядається як зерносховище, елеватор, ангар або склад зі зберігання зерна:

- на першому етапі зернове збіжжя перевозиться автотранспортними засобами з поля до тимчасової точки зберігання [6];
- на другому етапі з тимчасової точки зберігання зерно доставляється споживачеві [7].

На першому етапі автотранспортні засоби, раціональної вантажопідйомності, що чинять менший тиск на ґрунт, порівняно з існуючими виробничими вимушеними задіяними автотранспортними засобами, і що виробляють меншу масу викидів шкідливих речовин від працюючого теплового двигуна внутрішнього згорання [8], транспортують зерно на тимчасовий пункт зберігання, який у подальшому виступає як постачальник, що знаходиться в безпосередній близькості від

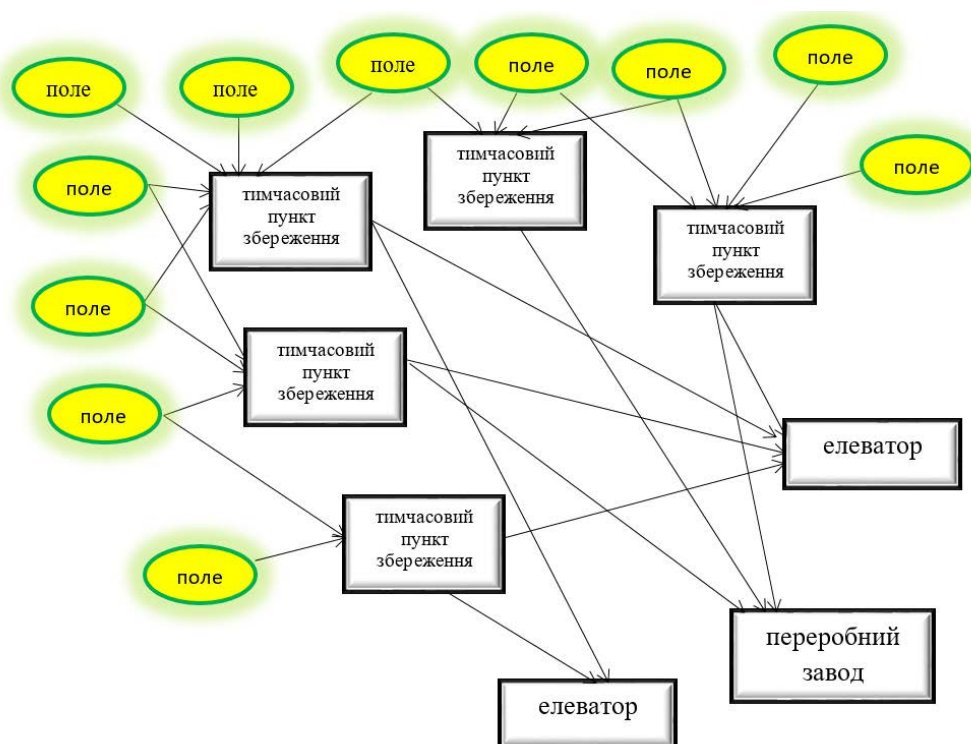


Рис. 1. Семантична схема перевезення автотранспортом зерна з поля до споживача через тимчасову точку зберігання

поля [9]. Тимчасовим пунктом зберігання може бути: відкритий або закритий майданчик, зерновий тік [10].

На другому етапі автотранспортними засобами великої вантажопідйомності зерно з тимчасового пункту зберігання перевозиться на зерносховище, яке обладнане сучасними високопродуктивними пристроями для первинної обробки та сушіння зерна [11].

Дана схема транспортування зернового збіжжя дозволяє вирішити проблеми зі зниження негативного антропогенного впливу автотранспорту за рахунок більш ефективної експлуатації автотранспортних засобів і підвищення якості та збереження зерна.

Аналіз досліджень і публікацій. Двоетапна схема перевезень зерна передбачає використання автотранспорту різної вантажопідйомності [12], що дозволяє раціональніше використовувати наявний типаж автотранспортних засобів. Перевезення зерна з поля на тимчасовий пункт зберігання передбачає використання автотранспорту меншої вантажопідйомності, який має велику маневреність, що відіграє дуже важливу роль при русі по полю від комбайна до комбайна і по ґрунтових дорогах сільської місцевості. До того ж він чинить менший тиск на орні шари ґрунту при русі по полю, а також за рахунок меншого об'єму двигуна викидає меншу масу вихлопних газів і менш згубний антропогенний вплив на навколишнє середовище [13].

Другий автотранспорт великої вантажопідйомності використовується для транспортування зерна з тимчасового пункту зберігання споживачеві. За рахунок того, що тимчасові пункти зберігання знаходяться безпосередньо біля доріг з асфальтовим покриттям, автотранспорту не доводиться заїжджати на поля і рухатися ґрунтовими дорогами з невеликою швидкістю. Даний факт дозволяє скоротити негативний вплив автотранспорту на екосистеми та зменшити матеріальні витрати на перевезення [14].

Застосування даної схеми передбачає, що зерно проходить обробку та сушіння не на низькопродуктивному обладнанні, використаному на токах і зерноприймальних пунктах, а на уніфікованому високопродуктивному обладнанні, встановленому на елеваторі та зерносховищі [15].

Внаслідок того, що більшість зерновиробників не мають власних елеваторів та потужностей по сушінню та обробці зерна, а добова пропускна здатність елеваторів не дозволяє прийняти все вироблене зерно, для скорочення втрат зерна зерновиробникам доводиться укладати договори на постачання зерна одночасно з кількома споживачами [16].

Цим зумовлено основну проблему – складність організації транспортного обслуговування всього комплексу об'єктів інфраструктури сільгосптоваровиробників.

Характерною рисою сучасних транспортних процесів при перевезенні зерна є висока динамічність самих транспортних процесів, що протікають, і тісний зв'язок їх з виробництвом. Часта зміна обсягів прибирання та високі вимоги до своєчасності транспортного обслуговування процесу збирання збіжжя змушують автотранспорт змінювати структуру обсягів потоків та організовувати транспортний процес з метою максимальної пристосованості до умов, що постійно змінюються [17]. Жорсткі вимоги своєчасного автотранспортного обслуговування збиральних операцій в умовах, що постійно змінюються, створюють об'єктивну необхідність гнучкої організації роботи автотранспорту. На підставі цього потрібно знайти найбільш правильний, раціональний план перевезень та визначити необхідну кількість автотранспортних засобів, яка дозволить виконати завдання з перевезення заданого обсягу збираного зерна в умовах діючої нерівномірності за мінімальних витрат.

Формулювання цілей статті. Мета статті полягає у формуванні методичних передумов обґрунтування моделі узгодження транспортних потоків перевезення збіжжя автотранспортними засобами з поля до тимчасового пункту зберігання.

З огляду на мету в статті окреслено такі завдання:

1. Обґрунтувати використання схеми двох стадій для транспортування збіжжя зі зменшенням негативного впливу на навколишнє середовище автотранспортних засобів.

2. Розробити математичну модель визначення обсягів транспортування обмолоченого зерна від комбайнів до пункту тимчасового зберігання з урахуванням втрат зерна при збиранні врожаю після оптимальних агротермінів.

3. Обґрунтувати доцільність цілочисельної виробничо-транспортної моделі, яка забезпечує максимальну адаптацію до реальних умов поставленого завдання перевезень збіжжя автотранспортом.

Основний матеріал дослідження. Для скорочення собівартості виробництва зерна процес доставки зерна з поля на тимчасовий пункт зберігання (рис. 2) необхідно розглядати разом із процесом збирання зерна.

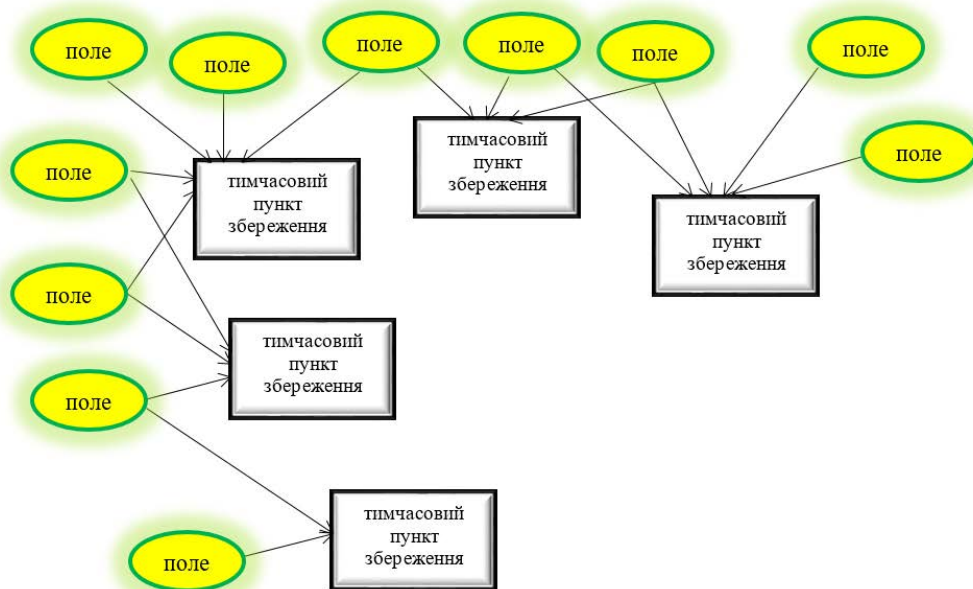


Рис. 2. Семантична схема перевезення автотранспортом зерна з поля на тимчасовий пункт зберігання

У Київській області найпоширенішими є прямі перевезення зерна, коли зерно з комбайна вивантажується в автотранспортний засіб, який може мати різну вантажопідйомність, і воно перевозить зерно на зерносховище. Такий вид перевезень при всіх своїх перевагах має одну негативну особливість: незгодженість організації транспортного процесу призводить до простоїв комбайнів в очікуванні прибуття автотранспортного засобу, для вивантаження заповненого бункера та автомобілів в очікуванні наповнення бункера комбайна, що знижує ефективність використання автотранспорту.

Виявлення таких простоїв призводить до того, що комбайни не повністю обмолочують намічений змінний виробіток, що надалі призводить до втрат зерна при збиранні після оптимальних агротермінів. Після настання повного дозрівання в зернових культурах починаються незворотні процеси: солома швидше старіє, починають рости бур'яни в посівах, що призводить до лежання хлібів та суттєво ускладнюються умови проведення збиральної кампанії. До того ж відбуваються додаткові втрати, спричинені самоосипанням зерна, проростанням його на корені, обламуванням колосків, поїданням частини зерна гризунами в період збирання тощо. Перераховані вище фактори позначаються на значних втратах і негативно впливають на якість зерна.

Враховуючи це, необхідно раціональніше планувати процеси, що відбуваються під час жнив, при цьому звертати увагу на такі параметри, як: вантажопідйомність

кожної моделі автотранспортного засобу, продуктивність зернозбиральних комбайнів, пропускна здатність зерносховищ. Усе це допоможе скоротити взаємні простой комбайнів та автотранспорту, простой автотранспортних засобів при вивантаженні зерна на зерносховище, точно розрахувати необхідну кількість автотранспортних засобів для обслуговування комбайнів, все це згодом призведе до зниження собівартості збиральної кампанії, збереження виробленого зерна та покращення його якості.

Більшість сільськогосподарських організацій, не володіючи належним фінансуванням, мають недостатню матеріальну базу, внаслідок чого потрібно розробити модель транспортування зерна, що дозволяє з мінімальними витратами провести збирання та транспортування зерна з наявних площ.

Враховуючи вищеописане, загальне завдання розділимо на два етапи розв'язання:

- визначення обсягів прибирання із закріплення полів за тимчасовими пунктами зберігання та розподіл обсягів перевезення за маршрутами;
- розрахунок потреби в автотранспорті з вантажопідйомності та маршрутів перевезень.

В основі критерію оптимальності запропонованої моделі лежить мінімум витрат від збирання, перевезення та втрат зерна від невчасного збирання.

В основі розробленої математичної моделі лежить клас динамічних транспортних потокових моделей, що є модифікацією виробничо-транспортної моделі. Її перевагою є те, що вона розглядає процес виробництва та транспортування зерна як єдине ціле, а також пропонує вирішення поставленого завдання з урахуванням продуктивності автотранспортних засобів та комбайнів. Крім того, ця модель враховує значення втрат зерна від невчасного збирання, оскільки маса втрат, досягаючи 20 % від зібраного врожаю, є одним із ключових факторів зниження собівартості виробництва та підвищення обсягів зібраного врожаю. Для визначення обсягів збирання та транспортування зерна було обрано саме цілочисельну модель, оскільки вона в розрахунках враховує варіанти збирання цілим числом комбайнів. Таким чином, запропонована нами модель стала новою модифікацією цілісної виробничо-транспортної моделі, що дає можливість знизити сумарні витрати на збирання та перевезення зерна, що дозволяє знайти оптимальний план збирання та транспортування зерна, розглядаючи дані етапи як єдиний процес, та враховувати втрати зерна від невчасного збирання.

На підставі виробничих можливостей, вартості збирання та перевезення зерна, пропускної спроможності пунктів зберігання необхідно вирішити задачу визначення оптимальних планів збирання та розподілу транспортних потоків збіжжя серед тимчасових пунктів зберігання, за умови мінімізації суми витрат на збирання та транспортування зерна з урахуванням втрат зерна.

Вибір оптимального варіанта обсягів прибирання та розподілу транспортних потоків ставиться як завдання мінімізації витрат:

$$\left(\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \left(c_{ij} z_{ij} + \sum_{j=1}^J q_{jir} \delta_{jir} c_{ij} \right) + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K f_{ijk} x_{jrk} \right) \rightarrow \min \quad (1)$$

$$\sum_{r=1}^R a_{jir} z_{ij} - \sum_{k=1}^K x_{jrk} \geq 0, i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J, \quad (2)$$

$$\sum_{r=1}^R z_{ij} \leq 1, i = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ijrk} \geq b_{ik}, k = 1, \dots, K; j = 1, \dots, J \quad (4)$$

$$x_{ijrk} \geq 0, i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K; \quad (5)$$

де $\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R (c_{ijr} z_{ij})$ – затрати на збирання збіжжя по r -у варіанту збирання на i -у полі;

$\sum_{i=1}^I (Q_{ijr} c_{ij} \delta_{ijr})$ – вартість втрат незібраного обсягу збіжжя на i -у полі при r -у варіанту збирання;

$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (t_{ijrk} x_{ijrk})$ – затрати на перевезення збіжжя j -го виду з i -у поля на k -й пункт зберігання;

j – вид сільськогосподарського збіжжя, $j = 1, \dots, J$;

k – пункт зберігання j -го сільськогосподарського збіжжя, $k = 1, \dots, K$;

i – поле збирання j -го сільськогосподарського збіжжя, $i = 1, \dots, I$;

r – варіанти кампанії i -го поля збирання j -го сільськогосподарського збіжжя, $r = 1, \dots, R$;

c_{ij} – сумарні затрати або валова собівартість варіанту кампанії i -го поля збирання j -го сільськогосподарського збіжжя;

z_{ij} – інтенсивність застосування варіанту кампанії i -го поля збирання j -го сільськогосподарського збіжжя, $z_{ij} \in \{0; 1\}$. Якщо в рішенні отримаємо $z_{ij} = 1$, тоді варіант входить в оптимальний план, а $z_{ij} = 0$ означає, що не входить. За цим по кожному полю може бути задіяно не більше одного варіанту;

Q_{ijr} – незібраний обсяг j -го сільськогосподарського збіжжя з i -го поля збирання за r -им варіантом кампанії;

δ_{ijr} – втрати обсягу j -го сільськогосподарського збіжжя з i -го поля за r -им варіантом кампанії;

c_{ijr} – вартість одиниці обсягу j -го сільськогосподарського збіжжя з i -го поля за r -им варіантом кампанії;

d – кількість днів збільшення за агротерміни збирання в j -го сільськогосподарського збіжжя з i -го поля за r -им варіантом кампанії;

t_{ijrk} – затрати на перевезення одиниці обсягу j -го сільськогосподарського збіжжя з i -го поля за r -им варіантом кампанії до k -го пункту зберігання;

x_{ijrk} – об'єм перевезення обсягу j -го сільськогосподарського збіжжя з i -го поля за r -им варіантом кампанії до k -го пункту зберігання;

a_{ijr} – обсяг виробництва j -го сільськогосподарського збіжжя з i -го поля за r -им варіантом кампанії;

b_{ijrk} – сумарна потреба перевезення одиниці обсягу j -го сільськогосподарського збіжжя з i -го поля за r -им варіантом кампанії до k -го пункту зберігання.

Пара $\langle z, x \rangle$ характеризує лише тоді виробничо-транспортний план, якщо z задовольняє умовам виразів (1), (2), (3), (4) і (5). При цьому z описує компоненту виробничого плану, а x – транспортного плану. Доданки цільової функції (2) представимо у виді таких рівнянь, що відображають відповідно виробничі та транспортні витрати з реалізації плану $\langle z, x \rangle$:

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K t_{ijk} x_{ijk} \quad (6)$$

$$f_1(z) = \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^R \left(c_{ij} z_{ij} + \sum_{j=1}^J Q_{ijr} \delta_{ijr} c_{ij} \right) \quad (7)$$

Виробничо-транспортний план $\langle z, x \rangle$ вважаємо допустимим, якщо він задовольняє умовам виразів (2)–(5), і оптимальним, якщо, крім того, доставляє мінімум функції (1).

Вирішення виразів (1)–(5) є рішенням задачі часткового цілочисельного лінійного програмування і характеризується низкою специфічних особливостей, зокрема:

- кожна змінна виду x_{ijk} входить лише у два обмеження, при чому в одне з обмежень з коефіцієнтом $+1$, а в інше – з коефіцієнтом -1 ;
- сукупність змінних x_{ijk} розпадається на кілька груп за кількістю вироблених j -го сільськогосподарського збіжжя;
- цілочисельні змінні можуть набувати лише два значення – 0 або 1 ;
- множина цілочисельних змінних розбита на групи, що не перетинаються за кількістю k -х пунктів зберігання, у кожній з яких лише одна змінна може бути відмінна від нуля.

Для вирішення цієї моделі розіб'ємо вихідну модель на дві складові: виробничу та транспортну. При цьому як навантаження (кінцева потреба) будемо розглядати сумарний попит по кожному i -у полю.

Отже, виробничу модель можна записати так:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R a_{ijr} z_{ij} \geq \sum_{k=1}^K b_{ijk}; j = 1, \dots, J; \quad (8)$$

$$\sum_{r=1}^R z_{ij} \leq 1, i = 1, \dots, I; \quad (9)$$

$$z_{ij} = 0, z_{ij} = 1; i = 1, \dots, I; r = 1, \dots, R; \quad (10)$$

$$f_1(z) = \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \left(c_{ij} z_{ij} + \sum_{j=1}^J Q_{ijr} \delta_{ijr} c_{ij} \right) \rightarrow \min. \quad (11)$$

Якщо рішення даної моделі існує, інакше і вихідна виробничо-транспортна модель не має рішення, то можна сформулювати I (за кількістю полів) транспортних завдань, де як обсяги поставок використовувати ті обсяги збирання, які зібрані у виробничій моделі представленій вище.

Приймаємо, що $z^0 = \{z_{ir}^0\}$ – оптимальний план виробничої моделі:

$$\sum_{r=1}^R a_{ijr} z_{ir}^0 = A_{ij0}, j = 1, \dots, J; i = 1, \dots, I; \quad (12)$$

де A_{ij0} – обсяг виробництва j -го сільськогосподарського збіжжя з i -го поля за r -им варіантом кампанії до k -го пункту зберігання, і можна сформулювати I транспортних задач виду:

$$\sum_{k=1}^K x_{ijk} \leq A_{ij0}; i = 1, \dots, I; \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ijrk} \geq b_{ijrk}; k = 1, \dots, K; \quad (14)$$

$$f_{2,j0}(z_0) = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K f_{ijrk} x_{ijrk} \rightarrow \min. \quad (15)$$

Сумарні виробничі та транспортні витрати на цьому кроці після вирішення серії транспортних завдань становитимуть:

$$F = f_1(z_0) + \sum_{j=1}^J f_{2,j0}(z_0) \quad (16)$$

Алгоритм передбачає побудову послідовності таких виробничих планів, котрим сума виробничих і транспортних витрат мінімальна. Оскільки отриманий на першому кроці виробничий план є найкращим з позиції витрат на виробництво продукції, поліпшення цієї суми можна досягти лише гірший виробничий план, але при цьому отримуючи велику економію на транспортних витратах.

Розглянуті нижче способи виключення неперспективних, які не призводять до суттєвої економії транспортних витрат, виробничих планів засновані на використанні подвійно допустимих систем потенціалів транспортних завдань. З їхньою допомогою формуються додаткові лінійні обмеження. Якщо виробничий план не задовольняє якомусь із таких обмежень, він свідомо є неперспективним і може бути виключений, тобто відповідні транспортні задачі не вирішуються. Приймаємо: F – сумарні виробничі та транспортні витрати на цьому поточному кроці, після вирішення серії транспортних задач; u_{ij} – подвійна змінна транспортної задачі, яка відповідає обмеженням виразу (17) на цьому ж кроці; v_{jk} – подвійна перемінна транспортної задачі, яка відповідає обмеженням виразу (18) на цьому ж кроці.

Запишемо сумарне значення витрат, використовуючи подвійне подання функціоналів транспортних задач:

$$F = \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R c_{ij} z_{ij} + \left(\sum_{j=1}^J \left(\sum_{k=1}^K b_{ijrk} v_{jk} - \sum_{i=1}^I a_{ijr} u_{ij} \right) \right) \quad (17)$$

Введемо таке обмеження для пошуку перспективного виробничого плану:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R c_{ij} z_{ij} + \left(\sum_{j=1}^J \left(\sum_{k=1}^K b_{ijrk} v_{jk} - \sum_{i=1}^I a_{ijr} z_{ij} u_{ij} \right) \right) \quad (18)$$

приведені подібні та перенісши незалежні від вибору виробничого плану складові в праву частину співвідношення:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R c_{ij} z_{ij} - \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R a_{ijr} z_{ij} u_{ij} < F + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K b_{ijrk} v_{jk} \quad (19)$$

або

$$\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \left(c_{ij} - \sum_{j=1}^J a_{ijr} u_{ij} \right) z_{ij} < F + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K b_{ijrk} v_{jk} \quad (20)$$

Варто відзначити, що величина:

$$\left(\sum_{j=1}^J \left(\sum_{k=1}^K b_{ijrk} v_{jk} - \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R a_{ijr} z_{ij} u_{ij} \right) \right) \quad (21)$$

є оцінкою транспортних витрат знизу для транспортного плану $x(z)$, якщо останній існує. Це є наслідком того, що допустимість, але не оптимальність, рішень двоїстих транспортних задач:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \left(c_{ij} - \sum_{j=1}^J a_{ijr} u_{ij} \right) \leq z_{ij} F + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K b_{ijrk} v_{jk} - \varepsilon \quad (22)$$

не залежить від вибору виробничого плану.

Відзначимо, що напрямок до оптимального виробничо-транспортного плану здійснюється за багатьма виробничими планами, для яких вирішуються транспортні задачі. Системи потенціалів, одержувані внаслідок розв'язання транспортних завдань, служать для побудови додаткових лінійних обмежень, що використовуються для відсівання неперспективних виробничих планів.

Таким чином, вирішення даної моделі дозволяє отримати:

- обсяги збирання збіжжя, тобто які поля необхідно почати прибирати в першу чергу і з якої площі;
- закріплення полів за тимчасовими пунктами зберігання дозволяє визначити обсяги зерна, які необхідно перевезти з кожного поля на потрібні тимчасові пункти зберігання;
- маршрути перевезень із мінімальними витратами;
- економічну оцінку виконаної роботи, тобто витрати на перевезення та збирання з урахуванням втрат зерна за кожним варіантом кампанії збирання, також можна отримати загальний результат оптимізації .

Висновки.

1. Для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище автотранспортних засобів пропонується використовувати схему двох стадій для транспортування збіжжя, які поєднуються зі споживачем через тимчасовий пункт зберігання, яка використовує невелику площу. Крім того, ця схема перевезення дозволяє підвищити ефективність автотранспортних засобів, а саме: раціонально використовувати транспортні засоби різної вантажопідйомності, використовувати поточну інфраструктуру сільськогосподарських виробників .

2. Розроблена математична модель визначення обсягів транспортування обмолоченого зерна від комбайнів до пункту тимчасового зберігання з урахуванням втрат зерна при збиранні врожаю після оптимальних агротермінів розглядає операції збирання та транспортування зерна як єдиний неподільний процес і дозволяє, завдяки раціональному розподілу транспортних потоків зібраного зерна, зменшити втрати зерна при збиранні врожаю за обмеження оптимальних агротермінів.

3. Використання цілочисельної виробничо-транспортної моделі забезпечує максимальну адаптацію розробленої моделі до реальних умов поставленого завдання, оскільки в розрахунках обсяг перевезень характеризується продуктивністю зернозбиральних комбайнів, що потім враховується для визначення раціональної кількості автотранспортних засобів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Tihanov G. Effect of transport vehicles on the grain harvester idle time during harvesting. *Agricultural Science and Technology*. 2021. Vol. 13, No 2, pp. 163–166. <https://doi.org/10.15547/ast.2021.02.027>.

2. Saparbayev A., Makulova A., Bayboltaeva N., Sarsenbieva N. & Imatayeva A. Modeling grain transportation in the system of grain processing industries. *SHS Web of Conferences*. 2021. Vol. 107. P. 06003. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202110706003>.
3. Dubbini M., Pezzuolo A., De Giglio M., Gattelli M., Curzio L. & Covi D. Last generation instrument for agriculture multispectral data collection. *CIGR Journal*. 2017. Vol. 19. P. 158–163.
4. Brown R., Richards A. Engineering principles of agricultural machinery. *ASABE*. 2018. Vol. 84 (2). P. 1120–1132.
5. Šotnar M., Pospíšil J., Mareček J., Dokukilová T. & Novotný V. Influence of the combine harvester parameter settings on harvest losses. *Acta Technologica Agriculturae*. 2018. Vol. 3. P. 105–108. <https://doi.org/10.2478/ata-2018-0019>.
6. Jain A., Palekar U. Aggregate production planning for a continuous reconfigurable manufacturing process. *Computers & Operations Research*. 2005. Vol. 32 (5). P. 1213–1236. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2003.11.001>.
7. Almosawi A., ALkhafaji A. & Alqazzaz K. Vibration transmission by combine harvester to the driver at different operative conditions during paddy harvest. *International Journal of Science and Nature*. 2016. Vol. 7(1). P. 127–133.
8. Samà M., Pellegrini P., D'Ariano A., Rodriguez J. & Pacciarelli D. On the tactical and operational vehicle routing selection problem. *Transportation Research*. 2017. Vol. 76 (1). P. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.12.010>.
9. Kuzmich I.M., Rogovskii I.L., Titova L.L. & Nadtochiy O.V. Research of passage capacity of combine harvesters depending on agrobiological state of bread mass. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 677. P. 052002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052002>.
10. Matindi R., Masoud M., Hobson P., Kent G. & Liu S. Harvesting and transport operations to optimise biomass supply chain and industrial biorefinery processes. *International Journal of Industrial Engineering Computations*. 2018. Vol. 9 (3). P. 265–288. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2017.9.001>.
11. Yezekyan T., Marinello F., Armentano G., Trestini S. & Sartori L. Modelling of harvesting machines' technical parameters and prices. *Agriculture*. 2020. Vol. 10. P. 194–203. <https://doi.org/10.3390/agriculture10060194>.
12. Воронков О. А., Роговський І. Л. Модель технологічної системи перевезення збіжжя збирально-транспортного комплексу агрохолдингу. *Розвиток транспорту*. Одеса. 2022. № 2(13) С. 42–52. <https://doi.org/10.33082/td.2022.2-13.04>
13. Воронков О. А., Роговський І. Л. Аналітичні положення ефективності роботи збирально-транспортного комплексу зернового збіжжя. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. 2022. Вип. 1 (51). С. 74–83. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-074-083>.

14. Воронков О. А., Роговський І. Л. Інженерний менеджмент моніторингу потоків транспортних засобів при збиранні збіжжя. *Автошляховик України*. 2023. № 3. С. 42–49. <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2023-3-275-42-49>.
15. Rogovskii I.L. Consistency ensure the recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. *Machinery & Energetics*. 2019. Vol. 10 (4). P. 145–150. <https://doi.org/10.31548/machenergy2019.04.145>.
16. Zagurskiy O. M., Pokusa Z. S., Pokusa F., Titova L. & Rogovskii I. Study of efficiency of transport processes of supply chains management under uncertainty. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole, 2020; ISBN 978-83-66567-13-9. P. 162.

REFERENCES

1. Tihanov, G. (2021). Effect of transport vehicles on the grain harvester idle time during harvesting. *Agricultural Science and Technology*. 13(2): 163–166. <https://doi.org/10.15547/ast.2021.02.027>.
2. Saparbayev, A., Makulova, A., Bayboltaeva, N., Sarsenbieva, N. & Imatayeva, A. (2021). Modeling grain transportation in the system of grain processing industries. *SHS Web of Conferences*. 107: 06003. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202110706003>.
3. Dubbini, M., Pezzuolo, A., De Giglio, M., Gattelli, M., Curzio, L. & Covi, D. (2017). Last generation instrument for agriculture multispectral data collection. *CIGR Journal*. 19: 158–163.
4. Brown, R., Richards, A. (2018). Engineering principles of agricultural machinery. *ASABE*. 84 (2): 1120–1132.
5. Šotnar, M., Pospíšil, J., Mareček, J., Dokukilová, T. & Novotný, V. (2018). Influence of the combine harvester parameter settings on harvest losses. *Acta Technologica Agriculturae*. 3: 105–108. <https://doi.org/10.2478/ata-2018-0019>.
6. Jain, A., Palekar, U. (2005). Aggregate production planning for a continuous reconfigurable manufacturing process. *Computers & Operations Research*. 32 (5): 1213–1236. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2003.11.001>.
7. Almosawi, A., Alkhafaji, A. & Alqazzaz, K. (2016). Vibration transmission by combine harvester to the driver at different operative conditions during paddy harvest. *International Journal of Science and Nature*. 7 (1): 127–133.
8. Samà, M., Pellegrini, P., D'Ariano, A., Rodriguez, J. & Pacciarelli, D. (2017). On the tactical and operational vehicle routing selection problem. *Transportation Research*. 76 (1): 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.12.010>.
9. Kuzmich, I.M., Rogovskii, I.L., Titova, L.L. & Nadtochiy, O.V. (2021). Research of passage capacity of combine harvesters depending on agrobiological state of bread mass. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 677: 052002. Retrieved from: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052002>.

10. Matindi, R., Masoud, M., Hobson, P., Kent, G. & Liu, S. (2018). Harvesting and transport operations to optimise biomass supply chain and industrial biorefinery processes. *International Journal of Industrial Engineering Computations*. 9 (3): 265–288. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2017.9.001>.
11. Yezekyan, T., Marinello, F., Armentano, G., Trestini, S. & Sartori, L. (2020). Modelling of harvesting machines' technical parameters and prices. *Agriculture*. 10: 194–203. <https://doi.org/10.3390/agriculture10060194>.
12. Voronkov, O.A. & Rogovskyi, I.L. (2022). Model of the technological system of grain transportation of grain harvesting and transport complex of agricultural holding. *Transport Development*. 2(13): 42–52. <https://doi.org/10.33082/td.2022.2-13.04>
13. Voronkov, O.A. & Rogovskyi, I.L. (2022). Analytical provisions of the efficiency of the grain grain harvesting and transport complex. *Bulletin of the National Transport University. Series: technical sciences*. 1(51): 74–83. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-074-083>.
14. Voronkov, O.A. & Rogovskyi, I.L. (2023). Engineering management of monitoring vehicle flows during grain harvesting. *Road Worker of Ukraine*. 3: 42–49. <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2023-3-275-42-49>.
15. Rogovskii, I.L. (2019). Consistency ensure the recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. *Machinery & Energetics*. 10(4): 145–150. <https://doi.org/10.31548/machenergy2019.04.145>.
16. Zagurskiy, O.M., Pokusa, Z.S., Pokusa, F., Titova, L. & Rogovskii I. (2020). Study of efficiency of transport processes of supply chains management under uncertainty. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole, 162. ISBN 978-83-66567-13-9.

SMART-КЛАСТЕРИ В ПОРТОВІЙ СИСТЕМІ УКРАЇНИ: КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ТА ПРИКЛАДНІ ОРІЄНТИРИ

О.В. Кириллова¹, В.Ю. Кириллова²

¹д. т. н., професор, завідувач кафедри «Експлуатація портів
і технологія вантажних робіт»,

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-3414-7364

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

Анотація

Вступ. У статті розглянуто передумови формування Smart-класстерів у портовій системі України як перспективного напрямку технологічної трансформації морської інфраструктури. Концепція Smart-класстеризації ґрунтується на поєднанні просторово-інфраструктурної інтеграції з впровадженням цифрових технологій (IoT, штучного інтелекту, блокчейн-рішень, цифрових двійників), що дозволяє переосмислити організацію портових процесів на основі мережевої взаємодії, адаптивності та технологічної взаємопов'язаності. **Мета** дослідження полягає в обґрунтуванні Концепції дворівневих Smart-класстерів як інструменту модернізації портової системи України, здатного забезпечити цифрову інтеграцію, екологічну сталість і масштабовану взаємодію з глобальними транспортними мережами, з урахуванням провідного міжнародного досвіду, актуальних технологічних трендів і стратегічних завдань інфраструктурного відновлення у поствоєнний період. **Результати.** У статті систематизовано теоретичні підходи до класстеризації портів, класифіковано типи портових класстерів, проаналізовано їхній вплив на ефективність портової інфраструктури. Розкрито ключову роль просторово-інфраструктурної класстеризації у взаємодії портів із національними та міжнародними транспортними мережами. Запропоновано Концепцію дворівневих Smart Port класстерів (Concept of Two-Level Smart Ports Clusters, TL-SPC) / Дворівневих Інтелектуальних портових класстерів (Concept of Two-Level Intelligent Port Clusters, TL-IPC), що поєднує міжпортову та внутрішньопортову інтеграцію, забезпечуючи масштабованість, функціональну цілісність і адаптивність. Розглянуто приклади формування Smart-класстерів у Європі (Північноморський мегакласстер) та Азії (Greater Bay Area, Китай), що підтверджують ефективність цифрової синергії у класстерних моделях. Встановлено, що дворівнева класстеризація слугує платформою для впровадження інтелектуальних технологій (штучного інтелекту, блокчейну, цифрових двійників) та сприяє екологічній трансформації. Запропонована модель формує стратегічну основу для трансформації українських портів у високотехнологічні інфраструктурні Smart-об'єкти, здатні забезпечувати безперервну цифрову

взаємодію, раціональне управління ресурсами та інтеграцію до глобальних транспортних мереж. **Висновок.** Дослідження підтвердило, що кластеризація є ключовим інструментом модернізації портів систем. Концепція TL-SPC/TL-IPC забезпечує структурну гнучкість, цифрову інтеграцію та підвищує інноваційний потенціал портів. Перехід до Глобальних Smart Port кластерів (Global Smart Port Clusters, G-SPC) або Глобальних Інтелектуальних портів кластерів (Global Intelligent Port Clusters, G-IPC) є наступним етапом еволюції портів систем, що передбачає комплексну інтеграцію в глобальну транспортну інфраструктуру. Запропонована концепція для України формує системоутворюючу основу для післявоєнного відновлення портів інфраструктури та її подальшого сталого розвитку, а також вимагає розроблення Національної Smart Port Стратегії та персоналізованих стратегій розвитку портів з урахуванням їхньої спеціалізації та інфраструктурного потенціалу.

Ключові слова: Smart Port, розумний порт, портові Smart-кластери, портові кластери, транспортні системи, транспортна інфраструктура, транспортні технології, вантажні перевезення.

SMART CLUSTERS IN THE PORT SYSTEM OF UKRAINE: CONCEPTUAL FOUNDATIONS AND PRACTICAL ORIENTATIONS

O.V. Kyrylova¹, V.Yu. Kyrylova²

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

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

Summary

Introduction. This article explores the prerequisites for the development of Smart Clusters within Ukraine's port system as a forward-looking vector of technological transformation in maritime infrastructure. The concept of Smart Clustering is based on the convergence of spatial-infrastructural integration with the deployment of advanced digital technologies—such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence, blockchain solutions, and digital twins. This synergy enables a rethinking of port operations through network-based interaction, adaptability, and technological interconnectivity. **Purpose.** The aim of this research is to substantiate the Concept of Two-Level Smart Clusters as a tool for modernizing Ukraine's port system, capable of ensuring digital integration, environmental sustainability, and scalable interaction with global transport networks, taking into account leading international experience, current technological trends, and the strategic tasks of infrastructure recovery in the post-war period. **Results.** The paper systematizes theoretical approaches to port clustering, classifies cluster types, and analyzes their impact on port infrastructure efficiency. It highlights the essential role of spatial and infrastructural clustering in enhancing the connectivity of ports with national and international transport corridors. The study introduces the Concept of Two-

*Level Smart Ports Clusters (TL-SPC) / Two-Level Intelligent Port Clusters (TL-IPC), combining inter-port and intra-port integration to ensure scalability, functional cohesion, and adaptive capacity. Case studies from Europe (North Sea Mega Cluster) and Asia (Greater Bay Area, China) demonstrate the effectiveness of digital synergy within cluster-based port models. The research confirms that two-level clustering acts as a platform for the implementation of intelligent technologies (AI, blockchain, digital twins) and supports the transition toward sustainable, environmentally conscious port operations. The proposed model lays a strategic foundation for transforming Ukrainian ports into high-tech Smart infrastructure nodes capable of continuous digital interaction, efficient resource management, and seamless integration into global transport networks. **Conclusions.** The findings underscore that clustering is a key instrument in modernizing port systems. The TL-SPC/TL-IPC framework offers structural flexibility, digital integration, and enhanced innovation potential. The transition towards Global Smart Port Clusters (G-SPC) or Global Intelligent Port Clusters (G-IPC) represents the next evolutionary step, emphasizing comprehensive integration into the global transport infrastructure. For Ukraine, this concept offers a system-building foundation for post-war reconstruction and sustainable redevelopment of port infrastructure. It also calls for the development of a National Smart Port Strategy and individualized port development strategies based on specialization and infrastructural capacity.*

Key words: Smart Port, intelligent port, port Smart Clusters, port clusters, transport systems, transport infrastructure, transport technologies, freight transportation.

Постановка проблеми. Сучасна світова портова індустрія переживає швидкі зміни під впливом цифрових технологій, автоматизації та інтеграції транспортних процесів. Традиційні портові системи вже не відповідають вимогам ефективності, екологічної стійкості та безпеки [1].

Концепція Smart Ports передбачає використання інтелектуальних технологій для підвищення ефективності, автоматизації процесів і цифрової взаємодії між усіма учасниками транспортного середовища. Однак ефективність окремих «розумних» портів буде обмеженою без створення єдиної мережі взаємодії між ними. Саме тому сучасна портова галузь потребує комплексного підходу, який реалізується через Концепцію Smart-кластерів. Вона передбачає інтеграцію кількох портів, транспортних вузлів, індустріальних зон та цифрових платформ у єдину високотехнологічну систему [2].

Через війну портова інфраструктура України зазнала значних втрат, що суттєво вплинуло на її функціонування, стан транспортних коридорів і загальну економічну ефективність. Блокада портів, руйнування критичних об'єктів та скорочення обсягів вантажоперевезень створили кризові умови для розвитку галузі. Однак після завершення воєнних дій відновлення портової системи має відбуватися не лише шляхом реконструкції зруйнованих об'єктів, а й через глибоку модернізацію. Реалізація Концепції Smart-кластерів сприятиме підвищенню конкурентоспроможності українських портів, їх технологічному розвитку та адаптації до глобальних транспортних тенденцій.

Актуальність дослідження. У післявоєнний період очікуються глибокі трансформації у структурі транспортних коридорів, торговельних потоків, економічних

зв'язків та геополітичних балансів у регіоні Чорного та Балтійського морів [2]. Одним із перспективних підходів до відновлення та модернізації портової системи України є впровадження Smart-кластерів – цифровізованих, автоматизованих та інтегрованих транспортних екосистем нового покоління [2]. Ця концепція дозволяє:

- створити єдину цифрову систему управління портами для ефективної взаємодії всіх учасників транспортного процесу;
- синхронізувати технологічні операції в межах кластеру, підвищуючи швидкість та ефективність вантажоперевезень;
- мінімізувати екологічний вплив портової діяльності завдяки інтелектуальному управлінню ресурсами;
- посилити конкурентоспроможність українських портів у глобальній транспортній системі.

Концепція Smart-кластерів передбачає об'єднання портів за географічними, функціональними та транспортними критеріями з метою оптимізації ланцюгів доставки та підвищення стійкості портової інфраструктури. Ефективність такого підходу підтверджується міжнародним досвідом кластерного управління, зокрема працями Майкла Портера [3] та інших дослідників. Дослідження [4] підкреслює важливість інтеграції Концепції Smart Ports у сучасні транспортні системи, що є особливо актуальним для України в контексті післявоєнної відбудови.

Таким чином, впровадження Smart-кластерів у портах України є стратегічно важливим кроком для модернізації морської інфраструктури та забезпечення її конкурентоспроможності [2]. Реалізація цієї Концепції дозволить не лише відновити втрачені потужності, а й створити сучасну транспортну систему, що відповідатиме міжнародним стандартам та сприятиме інтеграції України у європейські та світові ринки. Дослідження можливостей формування Smart-кластерів у портах України має визначальне значення для подальшого розвитку національної транспортної системи та її адаптації до нових гео економічних реалій.

Аналіз досліджень і публікацій за тематикою. Дослідження портової кластеризації активно проводяться в розвинених країнах, зокрема в Європі, Азії та Північній Америці. Наукові праці таких авторів, як Notteboom T., Rodrigue J.-P., De Langen P.W., та інших експертів [5–9] підтверджують ефективність кластерного підходу до організації функціонування портових комплексів. Портові кластери, такі як Rotterdam Smart Port (Нідерланди) та Singapore Maritime Cluster (Сінгапур), є успішними прикладами інтеграції цифрових технологій у портові екосистеми [1]. У фундаментальній праці [3] автор описує загальну концепцію кластерів та їх вплив на конкурентоспроможність регіонів і країн. У роботі [5] автори розглядають концепцію регіоналізації портів, яка передбачає їхню інтеграцію в регіональні логістичні мережі. Дослідження демонструє, що порти вже не є лише точками входу-виходу для товаропотоків, а стають частиною складних мульти-модальних логістичних ланцюгів. Формування портових кластерів розглядається як ключовий етап у розвитку сучасних портових систем. Дослідження [6] присвячене питанням управління морськими портовими кластерами. Автор аналізує механізми координації та взаємодії між державними регуляторами, приватними операторами та логістичними компаніями. Особлива увага приділена питанням

стратегії управління портовими кластерами для підвищення їхньої конкурентоспроможності. У роботі [7] розглядається роль портових кластерів у глобальних ланцюгах постачання. Автори досліджують, як порти можуть інтегруватися в міжнародні логістичні мережі, зокрема, через цифровізацію, автоматизацію та спільне використання інфраструктури. Дослідження містить порівняльний аналіз провідних світових портових кластерів. У статті [8] аналізується розвиток порту Дубай та його інтеграція в глобальні логістичні ланцюги. Автори визначають основні чинники, що впливають на формування стратегії портових кластерів, зокрема географічне розташування, державну політику та технологічні інновації. У статті [9] досліджується потенціал створення портових кластерів в Ірландії. Автори розглядають можливості кооперації між портами, що може сприяти підвищенню їхньої конкурентоспроможності. Робота містить детальний аналіз економічних вигод від кластерного підходу до розвитку портової інфраструктури.

Ці роботи є важливими для розуміння світового досвіду у сфері кластеризації портів та можуть бути використані для розробки моделей Smart-кластерів в Україні.

Формулювання цілей. Метою дослідження є обґрунтування Концепції дворівневих Smart-кластерів як інструменту модернізації портової системи України, здатного забезпечити цифрову інтеграцію, екологічну сталість і масштабовану взаємодію з глобальними транспортними мережами, з урахуванням провідного міжнародного досвіду, актуальних технологічних трендів і стратегічних завдань інфраструктурного відновлення у поствоєнний період.

Виходячи з мети, поставлені такі завдання:

1. Провести систематизацію теоретичних підходів до кластеризації портів, визначити основні типи портових кластерів та оцінити їхній вплив на ефективність портових систем.

2. Визначити роль просторово-інфраструктурної кластеризації у розвитку портових систем, а також їх взаємодії з національними та міжнародними транспортними мережами. Сформулювати положення щодо фундаментальної ролі просторово-інфраструктурної кластеризації у розвитку портових систем.

3. Обґрунтувати Концепцію Дворівневих Smart Port кластерів (Concept of Two-Level Smart Ports Clusters, TL-SPC) / Дворівневих Інтелектуальних портових кластерів (Concept of Two-Level Intelligent Port Clusters, TL-IPC) як інноваційну модель просторово-інфраструктурної кластеризації портів, передбачивши можливість її масштабування та трансформації у Концепцію Глобальних Smart Port кластерів (Concept of Global Smart Port Clusters, G-SPC) / Глобальних Інтелектуальних портових кластерів (Concept of Global Intelligent Port Clusters, G-IPC).

4. Оглянути приклади світового досвіду формування та розвитку Smart-кластерів у портовій індустрії.

5. Висвітлити можливості та перспективи впровадження концептуальної моделі Smart-кластерів у портову систему України в контексті глобальних трендів цифровізації, автоматизації та екологічної сталості, а також з урахуванням специфічних викликів і потреб, спричинених війною та необхідністю стратегічного відновлення української портової інфраструктури.

Основний матеріал дослідження. Кластеризація портів є сучасним підходом до підвищення ефективності та конкурентоспроможності морської

інфраструктури. Вона передбачає об'єднання портів та пов'язаних із ними підприємств у єдину систему для раціонального використання ресурсів, зниження витрат та стимулювання інновацій.

1. Теоретичні засади кластеризації портів. Кластеризація базується на концепції кластерів, яка була вперше детально описана Майклом Портером у його роботі «The Competitive Advantage of Nations» (1990) [3]. Портер визначив кластери як географічні концентрації взаємопов'язаних компаній, постачальників, сервісних фірм та пов'язаних інституцій у певній сфері, які одночасно співпрацюють та конкурують. Таким чином, класичне визначення кластеру передбачає сукупність взаємопов'язаних підприємств, організацій і структур, які взаємодіють у межах спільного економічного простору.

У контексті портової індустрії кластерний підхід передбачає інтеграцію портів, транспортних компаній, виробничих підприємств та інших зацікавлених сторін у єдину мережу. Це сприяє підвищенню ефективності технологічних процесів, зниженню витрат та стимулюванню інновацій.

У сучасній науковій літературі виокремлюють два основні підходи до визначення портових кластерів:

- міжпортові кластери – об'єднання кількох портів у рамках однієї економічної чи географічної зони, які спільно використовують транспортну інфраструктуру, технології та послуги;
- внутрішньопортові кластери – сукупність підприємств, що функціонують у межах одного великого порту, формуючи внутрішню мережу для інтеграції різноманітних функцій.

У наукових працях закордонних авторів також застосовуються інші підходи до класифікації портових кластерів, які враховують різноманітні характеристики та функції цих утворень. Наприклад:

- деякі класифікації акцентують увагу на рівні інтеграції між портами та на функціональних можливостях кластерів у глобальних транспортних ланцюгах;
- інші класифікації зосереджуються на взаємодії портів з іншими економічними секторами, такими як промисловість, енергетика та сільське господарство, підкреслюючи роль портових кластерів у розвитку регіональних економік;
- окремі підходи визначають порти як частину більш масштабних транспортних чи інфраструктурних мереж, що мають спільні інфраструктури та технології.

Така класифікація дозволяє врахувати важливість транспортних хабів, де порти є вузловими точками при взаємодії між різними видами транспорту. У цьому контексті порти розглядаються не лише як окремі інфраструктурні об'єкти, а й як частини міжнародних і міжрегіональних транспортних систем, які активно взаємодіють між собою для досягнення синергетичного ефекту.

Крім того, деякі класифікації зосереджуються на розвитку інноваційних портових технологій і послуг, таких як автоматизація вантажних операцій, використання «розумних» технологій для оптимізації портових процесів та підвищення енергоефективності.

Отже, загальний підхід до класифікації портових кластерів є багатограним і залежить від множини факторів, серед яких важливими є рівень інтеграції, функціональна спеціалізація та інноваційний потенціал портів у контексті глобальних

і локальних транспортних мереж. У зв'язку з цим існує кілька різних підходів до класифікації портових кластерів, які зосереджуються на різних аспектах їх функціонування та взаємодії. Серед них можна виділити такі класифікації, детально розглянуті в роботах закордонних авторів:

1. Функціональна класифікація [10]:

- транспортно-технологічні кластери зосереджені на наданні транспортних послуг, включаючи перевалку вантажів, зберігання та дистрибуцію;
- промислові кластери інтегрують виробничі підприємства, які використовують портову інфраструктуру для імпорту сировини та експорту готової продукції;
- інноваційні кластери спрямовані на розвиток досліджень та впровадження новітніх технологій у портовій сфері.

2. Географічна класифікація [6]:

- міжнародні кластери охоплюють порти, які обслуговують глобальні торговельні маршрути та мають стратегічне значення у світовій торгівлі;
- регіональні кластери об'єднують порти, що обслуговують певний географічний регіон та забезпечують внутрішньорегіональні перевезення;
- локальні кластери складаються з портів, які обслуговують місцеві потреби та мають обмежений радіус дії.

3. Структурна класифікація [11]:

- горизонтальні кластери об'єднують порти, які співпрацюють на одному рівні ланцюга постачання, наприклад кілька контейнерних терміналів;
- вертикальні кластери інтегрують порти з підприємствами різних рівнів ланцюга постачання, наприклад виробниками, дистриб'юторами та транспортно-експедиторськими компаніями.

4. Класифікація за рівнем інтеграції [12]:

- формальні кластери мають офіційно встановлені структури управління та координації між учасниками;
- неформальні кластери базуються на неофіційних домовленостях та співпраці між учасниками без чітко визначених структур.

Наведені вище систематизовані підходи до класифікації кластерів дають змогу висвітлити ключові теоретичні засади кластеризації портів, глибше усвідомити різноманітність портових кластерів та їхню функцію в глобальній економіці. Це, своєю чергою, створює підґрунтя для формування дієвих стратегій управління та розвитку портової інфраструктури.

Сучасний розвиток кластерних моделей передбачає інтеграцію таких технологій [1, 2]:

- штучного інтелекту та великих даних для прогнозування вантажопотоків;
- IoT (Інтернету речей) для моніторингу стану вантажів у режимі реального часу;
- блокчейну для забезпечення прозорості технологічних операцій;
- цифрових двійників портів для моделювання та оптимізації технологічних процесів.

2. Роль просторово-інфраструктурної кластеризації у розвитку портових систем. У сучасних умовах трансформації портової індустрії кластеризація портів відіграє дедалі важливішу стратегічну роль як інструмент підвищення конкурентоспроможності, технологічної ефективності та інтеграції в глобальні транспортні

мережі. Водночас наявні наукові підходи до кластеризації потребують уточнення та розширення, насамперед щодо визначення ролі просторово-інфраструктурної організації у формуванні та функціонуванні портових кластерів.

З огляду на це, у межах даного дослідження сформульовано низку теоретичних положень, що розкривають фундаментальне значення просторово-інфраструктурної кластеризації у розвитку портових систем. Це не лише актуалізує новий науковий підхід, а й створює умови для подальшого вдосконалення теоретико-методологічних засад кластеризації портів.

У цьому контексті просторово-інфраструктурна кластеризація розглядається не лише як основа класифікації або типологізації портових кластерів, але і як ключовий механізм їх створення, фундаментальна форма організації, функціонування, взаємодії та інтеграції у глобальні транспортні мережі. Такий підхід дозволяє осмислити кластеризацію як інструмент адаптації портових систем до сучасних викликів: цифрової трансформації, зростання екологічних вимог та автоматизації технологічних процесів.

На підставі проведеного аналізу теоретичні положення щодо ролі просторово-інфраструктурної кластеризації систематизовано в такий спосіб:

Положення 1. Міжпортові та внутрішньопортові кластери доцільно розглядати як ключові елементи просторово-інфраструктурної кластеризації портів.

Кластеризація портів базується на тривірневій ієрархічній структурі, що включає:

- макрорівень – міжнародні транспортні коридори, великі міжпортові кластери глобального масштабу;
- мезорівень – регіональні міжпортові кластери, які об'єднують декілька портів в межах однієї країни або суміжних країн, що функціонують у тісній взаємодії. Ці кластери можуть мати як національний (портові кластери однієї країни), так і транснаціональний характер (портові кластери різних країн);
- мікрорівень – внутрішньопортові кластери, що включають термінали, операторів, транспортні компанії та інших суб'єктів ринку портових послуг, які діють у межах одного порту.

Такий тривірневий підхід, а також гібридні варіанти кластеризації визначають провідну практику управління транспортними системами, портами та їх інфраструктурою. Вибір конкретного варіанту залежить від регіональної специфіки, рівня технологічного розвитку, ступеня цифровізації та масштабів транспортної мережі.

Приклади реалізації тривірневої кластеризації:

- Європейська транспортна мережа TEN-T (Trans-European Transport Network, TEN-T): на макрорівні – об'єднання основних транспортних вузлів у міжнародні коридори; на мезорівні – створення регіональних транспортних центрів; на мікрорівні – функціонування локальних терміналів.
- Порт Сінгапуру: на макрорівні – глобальна інтеграція в азійські транспортні мережі; на мезорівні – регіональна кооперація з портами Малайзії та Індонезії; на мікрорівні – цифрові та автоматизовані внутрішньопортові термінали.

Міжпортові та внутрішньопортові кластери в межах існуючого підходу до класифікації портових кластерів є невід'ємними елементами просторово-інфраструктурної кластеризації. Вони не лише типологічно належать до класифікації

портових кластерів, але й визначають територіальну організацію портів. Міжпортові та внутрішньопортові кластери виступають організаційно-просторовими формами реалізації кластерного підходу, формуючи основу для розвитку сучасних транспортних технологій, оптимізації вантажопотоків та ефективної інтеграції у міжнародні транспортні мережі.

Положення 2. Міжпортові кластери формуються через регіоналізацію портів і об'єднання їх форлендів та хінтерлендів в єдину систему.

Такі кластери виникають у процесі інтеграції прибережних портів із навколишніми територіями та внутрішніми регіонами [13], що дозволяє сформувати єдину транспортно-інфраструктурну систему. Така взаємодія виступає не лише типологічною ознакою, а й чинником підвищення ефективності використання ресурсів та територіального розвитку. Це створює умови для інтеграції портів у глобальні транспортні ланцюги.

Міжпортові кластери сприяють оптимізації вантажопотоків; ефективній координації та взаємодії між портами і перевізниками; підключенню до глобальних транспортних коридорів.

На підставі вищесказаного сформулюємо наступне визначення (рис. 1):

Міжпортовий кластер – це інтегроване об'єднання декількох портів у межах однієї гео економічної зони, які спільно використовують транспортну інфраструктуру та технології, координують свої форленди, хінтерленди, вантажопотоки, потоки транспортних засобів, транспортні зв'язки, інформаційні системи й технологічні процеси, функціонуючи в межах регіоналізованого середовища. Така взаємодія не лише визначає типологічні характеристики, а й виступає важливим чинником підвищення ефективності використання ресурсів і сприяння територіальному розвитку, що створює передумови для функціонування кластера як єдиної інтегрованої структури.

Положення 3. Внутрішньопортові кластери є ядром локальної просторової організації портової діяльності. Вони формуються як сукупність підприємств, портових операторів та інших суб'єктів ринку, що функціонують у межах однієї портової території. Їхня взаємодія забезпечує: синергетичний ефект за рахунок координації операцій; підвищення ефективності портових процесів; сталий розвиток інфраструктури. Таким чином, внутрішньопортові кластери не є лише територіальними об'єднаннями підприємств, а являють собою комплексні просторово-інфраструктурні системи, що забезпечують координацію діяльності суб'єктів у межах визначеної портової території та акваторії, підвищуючи ефективність портових операцій.

На підставі вищесказаного сформулюємо таке визначення (рис. 1):

Внутрішньопортовий кластер – це інтегроване виробничо-економічне об'єднання підприємств, що функціонують у межах одного порту (його території та акваторії, визначених законодавством), формуючи локалізовану мережу взаємодії для координації ключових функцій портової діяльності та забезпечення синергетичної співпраці всіх учасників кластера. В умовах цифровізації, автоматизації та екологічної трансформації такі кластери сприяють підвищенню конкурентоспроможності порту та сталому розвитку його інфраструктури.



Рис. 1. Структуруючі елементи просторово-інфраструктурної кластеризації портів

Положення 4. Просторово-інфраструктурна кластеризація є базовим механізмом формування портових систем.

Вона визначає структурну організацію кластерів, функціональну взаємодію між суб'єктами ринку та рівень інтеграції портів у глобальні транспортні мережі. Будь-який портовий кластер функціонує на основі взаємопов'язаних виробничих, транспортних, фінансових, інформаційних потоків, які формують єдину екосистему. У цьому контексті просторово-інфраструктурна організація не лише забезпечує фізичну присутність і координацію учасників, а й визначає саму можливість існування кластерних форм організації портової діяльності.

Положення 5. Сучасні тенденції свідчать, що просторово-інфраструктурна кластеризація не лише забезпечує локальну взаємодію між портами, а й виступає ключовим механізмом їх глобальної інтеграції.

Просторово-інфраструктурна кластеризація дозволяє: ефективно інтегрувати порти в міжнародні транспортні коридори та глобальні ланцюги постачання; реалізувати Концепцію Smart Ports; адаптувати порти до викликів цифровізації, глобалізації та екологічної трансформації. Кластеризація, яка виходить за межі локальної взаємодії, стає інструментом глобальної трансформації портової індустрії, формуючи нові моделі співпраці, координації та інтеграції між портами на світовому рівні.

Таким чином, просторово-інфраструктурна кластеризація не лише окреслює структурні контури сучасних портових систем, але й визначає стратегічні напрями

їх розвитку в умовах цифрової економіки, технологічної еволюції та екологічних викликів. Вона виступає фундаментальною платформою для формування та реалізації нової Концепції Дворівневих Smart Port кластерів (Concept of Two-Level Smart Ports Clusters, TL-SPC) з можливістю подальшого масштабування та трансформації в Концепцію Глобальних Smart Port кластерів (Concept of Global Smart Port Clusters, G-SPC). Йдеться про концепції інтелектуальних, сталих та інтегрованих портових кластерів, здатних ефективно функціонувати у складному глобальному середовищі.

3. Концепція Дворівневих Smart Port кластерів: стратегія масштабування у глобальну кластерну архітектуру. На основі вищезазначених положень можна зробити припущення, що просторово-інфраструктурна кластеризація портів на мезорівні розвивається відповідно до загальної тенденції глобалізації та масштабування, охоплюючи як міжпортові, так і внутрішньопортові кластерні утворення. Виходячи з цієї закономірності, доцільно сформулювати Концепцію Дворівневої кластеризації портів, у межах якої інтеграція міжпортових і внутрішньопортових кластерів забезпечує формування нової масштабної функціональної структури. Такий підхід сприяє підвищенню ефективності функціонування портових систем, поглибленню їх інтеграції у міжнародні транспортні мережі та зміцненню конкурентоспроможності.

Логічним продовженням такого підходу є його концептуалізація у таких варіантах:

– на макрорівні – Концепція Глобальних Smart Port кластерів (Global Smart Port Clusters, G-SPC) або Глобальних Інтелектуальних портових кластерів (Global Intelligent Port Clusters, G-IPC);

– на мезорівні – Концепція Дворівневих Smart Port кластерів (Two-Level Smart Port Clusters, TL-SPC) або Дворівневих Інтелектуальних портових кластерів (Two-Level Intelligent Port Clusters, TL-IPC).

З метою подальшого конкретизування визначених ідей викладемо їх теоретичні засади, які обґрунтовують необхідність інтеграції різних фаз кластеризації у глобальній транспортній системі.

Основні теоретичні положення:

Положення 1. Концепція TL-SPC/TL-IPC пропонує новий інтеграційний підхід до просторово-інфраструктурної кластеризації портів, що передбачає структурне та функціональне поєднання міжпортових і внутрішньопортових кластерів. У межах такої моделі формується єдина масштабована система, яка створює синергію між окремими елементами портової інфраструктури й забезпечує її адаптивність та стійкість у глобальному транспортному середовищі.

Положення 2. Кластер, сформований на основі інтеграції міжпортових і внутрішньопортових структур, доцільно ідентифікувати як Дворівневий Smart Port кластер (TL-SPC) або Дворівневий Інтелектуальний портовий кластер (TL-IPC). Такий кластер функціонує як адаптивна, динамічна система з високим рівнем гнучкості, здатна трансформуватись відповідно до змін у зовнішньому середовищі.

Положення 3. Кластер TL-SPC/TL-IPC забезпечує високий рівень інтеграції між його учасниками: узгодженість інформаційних потоків, оптимізацію ресурсів та зростання операційної ефективності. Його роль полягає не лише

у функціонуванні як транспортно-інфраструктурного комплексу, а й у створенні платформи для цифрової трансформації, автоматизації та інноваційного розвитку портової галузі.

Положення 4. Функціональна структура кластеру TL-SPC/TL-IPC базується на принципах: системної інтеграції; цифрової трансформації; сталого розвитку. Це дозволяє:

- оптимізувати транспортні потоки за рахунок впровадження інноваційних технологій та автоматизованих систем управління;
- зменшити екологічне навантаження через використання «зелених» технологій та енергоефективних рішень;
- забезпечити глобальну синергію між портами, транспортними коридорами та логістичними хабами;
- гарантувати високу адаптивність до технологічних змін, ринкових коливань та нових вимог у глобальному транспортному середовищі.

Положення 5. Кластери TL-SPC/TL-IPC виконують ключову роль у світовій транспортній мережі, виступаючи як:

- єдиний цифровий простір для обміну інформацією між портами та транспортними операторами;
- середовище для впровадження штучного інтелекту, блокчейн-технологій та автоматизованих алгоритмів управління;
- інтеграційна платформа для розвитку мультимодальних транспортних систем;
- інструмент формування глобальної конкурентоспроможності портових систем.

Положення 6. Просторово-інфраструктурна кластеризація у формі TL-SPC/TL-IPC має розглядатися не лише як інструмент класифікації, а і як базова системоутворююча модель організації портових систем. Вона формує основу для забезпечення узгодженої взаємодії між структурними рівнями управління, інтегрує порти у глобальні транспортні мережі та підвищує їхню функціональну стійкість у динамічному середовищі міжнародних перевезень.

Положення 7. Реалізація концепції TL-SPC/TL-IPC та перехід до форматів G-SPC/G-IPC – це стратегічна модель трансформації глобальної портової інфраструктури, яка поєднує інноваційність, гнучкість управлінських рішень, цифрову підтримку процесів та орієнтацію на принципи сталого розвитку. У цьому контексті порти перестають бути лише транспортними вузлами й перетворюються на стратегічні структуроутворюючі елементи, що формують інфраструктурний каркас глобальних транспортних зв'язків. Вони не лише забезпечують ефективну інтеграцію міжрегіональних потоків, а й функціонують як платформи для цифрових сервісів, інтелектуального управління та адаптивної координації в умовах динамічного глобального середовища.

4. Світовий досвід формування та розвитку Smart-кластерів у портовій індустрії. Інституціоналізація та практична реалізація Концепції Smart Port кластерів у сучасному світі набувають все більшого поширення. У різних регіонах спостерігається тенденція до формування не лише окремих цифрових або автоматизованих портів, а саме кластерних структур, які об'єднують інтелектуальні рішення на декількох рівнях: внутрішньопортовому, міжпортовому та макрорегіональному. Цей підхід узгоджується із запропонованою вище Концепцією Дворівневих

Smart Port кластерів (TL-SPC / TL-IPC), в основі якої лежить інтеграція кластерів у масштабну функціональну екосистему. У цьому контексті особливо показовими є кейси Європейського та Азійського регіонів, де реалізація кластерної моделі відбувається на високому рівні інтеграції.

А) Європейський кейс. Північноморський Smart Port мегакластер.

У межах північноєвропейського регіону формується один із найбільш показових прикладів мезо- та макрокластеризації – Північноморський Smart Port мегакластер, до складу якого входять ключові глибоководні порти Західної Європи: Роттердам, Антверпен, Гамбург та низка менших портів Північного моря [1].

Ключові характеристики:

- інтеграція цифрових платформ для управління ланцюгами поставок (Port Community Systems);
- автоматизація вантажопереробки, використання цифрових двійників портової інфраструктури;
- єдиний цифровий простір, що забезпечує обмін даними між портами та терміналами;
- міжпортова координація екологічних ініціатив, зокрема у сфері скорочення викидів CO₂;
- переорієнтація з конкуренції на кооперацію, що дозволяє будувати кластерну стратегію розвитку в межах макрорегіону.

Усі ці аспекти свідчать про наявність дієвої дворівневої структури, що поєднує індивідуальні Smart-ініціативи портів з їх синергетичною взаємодією на міжпортовому та макрорівнях.

Б) Азійський кейс. Smart-кластер Greater Bay Area, Китай

Інший стратегічно важливий приклад кластеризації – це регіон Greater Bay Area на півдні Китаю, який охоплює порти Шеньчжень, Гонконг, Гуанчжоу та інші транспортні вузли. У межах цієї агломерації реалізується інтегрована Smart-екосистема портів, що підтримує як регіональні, так і глобальні потоки.

Ключові характеристики:

- цифрова уніфікація портових операцій, впровадження AI-рішень для управління транспортними потоками;
- створення єдиного інформаційного середовища, що об'єднує комерційні, адміністративні та технологічні компоненти;
- спільне управління даними та транспортною інфраструктурою в межах регіону;
- високий рівень технологічної взаємодії між портами з урахуванням державної стратегії «Один пояс – один шлях».

Цей приклад демонструє успішне втілення дворівневої моделі кластеризації з подальшим переходом до макрорівневої координації на міжнародному рівні, що повністю відповідає запропонованій вище ідеї Global Smart Port Clusters (G-SPC / G-IPC).

Таким чином, світовий досвід підтверджує ефективність кластерного підходу до цифрової трансформації портів, який ґрунтується на таких положеннях:

- поєднання інтелектуальних технологій з просторовою координацією;
- поступовий перехід від внутрішньопортових Smart-рішень до міжпортової інтеграції;

– розвиток функціональної взаємодії в межах макрорегіонів та глобальних транспортних мереж;

– створення умов для підвищення конкурентоспроможності портових систем.

Розглянуті приклади підтверджують доцільність адаптації запропонованої вище Концепції TL-SPC / TL-IPC до розвитку національних портових систем.

5. Потенціал впровадження концептуальної моделі Smart-кластерів у портову систему України в умовах глобальних трендів та післявоєнного відновлення. Україна має стратегічно вигідне географічне розташування та сформовану систему морських і річкових портів. Проте внаслідок масштабної військової агресії РФ більшість ключових портів зазнали суттєвих ушкоджень, що поставило перед країною безпрецедентні завдання з їх відновлення, модернізації та адаптації до нових умов і вимог глобальних транспортних систем.

У цьому контексті концепція Smart-кластерів постає як інноваційний інструмент для трансформації портової системи України. Її реалізація дозволить спрямувати відновлення портової інфраструктури у бік цифрової, автоматизованої, екологічно сталої та економічно ефективної моделі розвитку. Впровадження Smart-кластерів забезпечить підвищення конкурентоспроможності українських портів, посилення їх інтеграції у світові транспортні мережі та зміцнення ролі України в глобальних ланцюгах постачання.

Концептуальна модель Smart-кластерів для українських портів передбачає поєднання передових технологій, інноваційних управлінських підходів та орієнтацію на сталий розвиток. До її ключових компонентів належать:

– цифрова платформа управління портом – інтегрована інформаційна система, що забезпечує взаємодію всіх учасників транспортного процесу, оптимізацію ланцюгів постачання та підвищення операційної ефективності за допомогою штучного інтелекту та блокчейн-технологій. В умовах післявоєнного відновлення така платформа стане базовим інструментом забезпечення безпеки та захисту даних, зокрема для контролю руху товарів та запобігання незаконному переміщенню вантажів;

– автоматизовані транспортні коридори – впровадження цифрових рішень для забезпечення безперервного, безпечного та ефективного руху вантажів, зокрема, через використання інтелектуальних транспортних систем (ITS), автономних транспортних засобів, роботизованих перевантажувальних комплексів;

– екологічний моніторинг та енергоефективність – використання IoT-технологій для моніторингу екологічного стану портів, включаючи рівень викидів забруднюючих речовин, стан водного середовища та управління відходами. Не менш важливим є впровадження технологій відновлюваної енергетики, зокрема сонячних, вітрових і гідроенергетичних установок, що дозволять забезпечити сталий розвиток портових операцій навіть у складних умовах післявоєнного відновлення інфраструктури;

– мультимодальна інтеграція – розширення мультимодальних перевезень через цифрові платформи взаємодії між портами та залізничними, автомобільними і річковими терміналами. З огляду на потребу оптимізації маршрутів у післявоєнний період, інтеграція різних видів транспорту допоможе зменшити залежність від порушених чи відновлюваних інфраструктур;

– кібербезпека та цифровий суверенітет – створення національної системи кіберзахисту портової інфраструктури та критичних ІТ-компонентів для забезпечення стабільної роботи портових систем та захисту інформаційних потоків. Це дозволить не лише гарантувати безперебійну реалізацію портових операцій, а й зберегти контроль над національним інформаційним середовищем у період підвищених зовнішніх загроз.

Реалізація концепції Smart-кластерів у портовій системі України повинна здійснюватися поступово, із пріоритетом на відновлення критичних вузлів портової системи, які забезпечують міжнародну торгівлю, експортний потенціал та зв'язок із ключовими європейськими транспортними коридорами.

Реалізація цієї концепції матиме мультиплікативний ефект: відновлення конкурентоспроможності українських портів, підвищення ефективності мультимодальних перевезень, розширення інтеграції у міжнародні транспортні мережі, зниження вразливості до зовнішніх викликів і формування стійкої, інноваційної транспортної системи, здатної адаптуватися до глобальних змін.

Подальші дослідження мають зосередитися на розробці поетапної дорожньої карти впровадження Smart-кластерів у національну портову систему з урахуванням: актуальних безпекових вимог; стану критичної інфраструктури; фінансово-економічних обмежень; потреб міжнародної торгівлі.

Особливу увагу слід приділяти економічній доцільності створення окремих портових Smart-кластерів у межах Національної стратегії розвитку інтелектуальних портів (National Strategy for the Development of Smart Ports), що має стати базовим документом для післявоєнного оновлення української портової галузі [4; 14].

Таким чином, запровадження Smart-кластерів у портовій системі України стане ключовим чинником її післявоєнної відбудови та інтеграції в сучасну глобальну транспортну систему. Реалізація цієї концепції сприятиме створенню інноваційної транспортної екосистеми, що відповідатиме світовим тенденціям цифровізації, автоматизації та екологічної стійкості. Це, своєю чергою, дозволить підвищити конкурентоспроможність українських портів, забезпечити ефективний розвиток мультимодальних перевезень та посилити позиції України у світовій системі транспортних комунікаційних мереж.

Водночас необхідно поглибити дослідження щодо формування поетапного плану впровадження Smart-кластерів, що враховуватиме актуальні безпекові ризики, стан критичної інфраструктури та адаптацію до нових економічних реалій. Важливим напрямом є також оцінка економічної ефективності створення кожного окремого портового Smart-кластера в контексті загальної Smart Port Стратегії розвитку національної портової системи України. Деталізація цієї Стратегії повинна передбачати локальні (персоналізовані) стратегії для кожного українського порту з урахуванням його спеціалізації, транспортних зв'язків і потенціалу інтеграції в міжнародні транспортні ланцюги [4; 14].

Висновки. Кластеризація портів виступає стратегічним інструментом підвищення ефективності та конкурентоспроможності морської інфраструктури, забезпечуючи зниження витрат і стимулювання інновацій. Сучасна кластерна модель, інтегрована з інтелектуальними технологіями (ШІ, блокчейн, цифрові двійники), підсилює роль портів у глобальних транспортних системах. Запропонована нова

Концепція Дворівневих Smart Port кластерів (TL-SPC) / Дворівневих Інтелектуальних портових кластерів (TL-IPC) поєднує міжпортову та внутрішньопортову кластеризацію, створюючи цілісну цифрову архітектуру, що сприяє масштабованості, трансформації та сталому розвитку. Подальшим етапом її еволюції є формування Концепції Глобальних Smart Port кластерів (G-SPC) / Глобальних Інтелектуальних портових кластерів (G-IPC) – нових підходів, що орієнтовані на глибоку інтеграцію до міжнародних транспортних мереж із фокусом на інновації, цифровізацію та екологічну сталість. Міжнародні приклади, зокрема Північноморський мегакластер і Greater Bay Area в Китаї, підтверджують ефективність такої моделі, заснованої на цифровій синергії та екополітиці. Для України Концепція Smart-кластерів може стати основою трансформації портової системи в умовах післявоєнного відновлення, забезпечуючи цифрову сумісність, національну безпеку та формування персоналізованих Стратегій розвитку портів з урахуванням їхньої спеціалізації, інфраструктурного стану та інтеграційного потенціалу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. «Smart Ports» як інноваційний вектор технологічної трансформації та цифровізації портів: від ідеї до концепції та практичної реалізації. *Розвиток транспорту. Транспортні технології (за видами)*. 2024. № 4(23). С. 77–95. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.4-23.07>.
2. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. Концепція Smart-кластерів у портах України. *Marine Power Plants & Operation, MPP&O-2025* : матеріали V Міжнародної морської науково-практичної конференції кафедри СЕУ і ТЕ, м. Одеса, 04 березня 2025 р. Одеса: ОНМУ, 2025. URL: <https://drive.google.com/file/d/1P7siNJ6FHyKq9HLxS8I9mumaVnamzYR8/view>.
3. Porter M. E. *The Competitive Advantage of Nations*. New York : Free Press, 1990.
4. Kyryllova O., Kyryllova, V., Mahamadov, O., & Romakh, V. Smart port: the latest technologies and international experience in their implementation. *Transport Development*. 2024. № 2(21). С. 62–74. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.2-21.06>.
5. Notteboom, T., & Rodrigue, J.-P. (2005). *Port Regionalization: Towards a New Phase in Port Development*.
6. De Langen, P. W. Governance in seaport clusters. *Maritime Economics & Logistics*. 2004. № 6(2). P. 141–156.
7. Song, D.-W., & Panayides, P. M. *Global Supply Chain and Port/Terminal: Integration and Competitiveness*. 2008.
8. Jacobs, W., & Hall, P. V. *What Conditions Supply Chain Strategies of Ports? The Case of Dubai*. 2007.
9. Brett, V., & Roe, M. *The Potential for Port Clustering in Ireland*. 2010.
10. Notteboom, T., & Winkelmann, W. Reassessing public sector involvement in European seaports. *International Journal of Maritime Economics*. 20013. № 2. P. 242–259.

11. Song, D. W. Port co-opetition in concept and practice. *Maritime Policy & Management*. 2003. № 30(1). P. 29–44.
12. Van der Lugt, L. M., De Langen, P. W., & Hagdorn, L. Beyond the landlord: worldwide empirical analysis of port authority strategies. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*. 2003. № 5(1). P. 1–16.
13. Kyryllova O., & Kyryllova V. Теоретичні основи просторової та функціональної еволюції портів. *Транспортні системи і технології*. 2022. № 40. P. 170–189. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-15>.
14. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю., Магамадов О.Р. Поняття «Smart Port» у контексті глобальних тенденцій інтеграції інтелектуальних транспортних та інформаційних технологій у портовій індустрії. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. Том 35(74). № 5. Видавничий дім «Гельветика», 2024. С. 81–87. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/14>.

REFERENCES

1. Kyryllova O.V., Kyryllova V.Y. (2024). «Smart Ports» as an innovative vector of technological transformation and digitalization of ports: from idea to concept and practical implementation [«Smart Ports» як innovatsiynyi vektor tekhnolohichnoi transformatsii ta tsyfrovizatsii portiv: vid idei do kontseptsii ta praktychnoi realizatsii]. *Transport development. Transport technologies (by type)*, 4(23), p. 77. Видавничий дім «Гельветика». DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.4-23.07> [in Ukrainian].
2. Kyryllova O.V., Kyryllova V.Y. (2025). The concept of Smart clusters in the ports of Ukraine [Kontseptsiiia Smart-klasteriv u portakh Ukrainy]. *Marine Power Plants & Operation, MPP&O-2025: materials of the V International Maritime Scientific and Practical Conference of the Department of SEU and TE (Odesa, March 04, 2025) / Odessa National Maritime University*. Odesa, ONMU. URL: <https://drive.google.com/file/d/1P7siNJ6FHyKq9HLxS8I9mumaVnamzYR8/view> [in Ukrainian].
3. Porter M.E. (1990). *The Competitive Advantage of Nations*. New York: Free Press.
4. Kyryllova O., Kyryllova, V., Mahamadov, O., & Romakh, V. (2024). Smart port: the latest technologies and international experience in their implementation [Smart-port: novitni tekhnolohii ta mizhnarodnyi dosvid yikh vprovadzhennia]. *Transport Development*, 2(21), 62–74. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.2-21.06> [in Ukrainian].
5. Notteboom, T., & Rodrigue, J.-P. (2005). *Port Regionalization: Towards a New Phase in Port Development*.
6. De Langen, P. W. (2004). Governance in seaport clusters. *Maritime Economics & Logistics*, 6(2), 141–156.
7. Song, D.-W., & Panayides, P. M. (2008). *Global Supply Chain and Port/Terminal: Integration and Competitiveness*.
8. Jacobs, W., & Hall, P. V. (2007). *What Conditions Supply Chain Strategies of Ports? The Case of Dubai*.

9. Brett, V., & Roe, M. (2010). The Potential for Port Clustering in Ireland.
10. Notteboom, T., & Winkelmann, W. (2001). Reassessing public sector involvement in European seaports. *International Journal of Maritime Economics*, 3(2), 242–259.
11. Song, D. W. (2003). Port co-opetition in concept and practice. *Maritime Policy & Management*, 30(1), 29–44.
12. Van der Lugt, L. M., De Langen, P. W., & Hagdorn, L. (2003). Beyond the landlord: worldwide empirical analysis of port authority strategies. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 5(1), 1–16.
13. Kyrylova O.V., Kyrylova V.Y. (2022). Theoretical foundations of spatial and functional evolution of ports [Teoretychni osnovy prostorovoi ta funktsionalnoi evoliutsii portiv] // *Transportation systems and technologies*, (40), 170–189. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-15> [in Ukrainian].
14. Kyrylova O.V., Kyrylova V.Y., Mahamadov O.R. (2024). The concept of «Smart Port» in the context of global trends in the integration of intelligent transport and information technologies in the port industry [Poniattia «Smart Port» u konteksti hlobalnykh tendentsii intehratsii intelektualnykh transportnykh ta informatsiinykh tekhnolohii u portovii industrii] // *Scientific journal «Scientific notes of the V.I. Vernadsky TNU. Series: Technical Sciences»*. Volume 35(74), No. 5, Helvetica Publishing House, p. 81–87. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/14> [in Ukrainian].

INFRASTRUCTURAL PROBLEMS OF IMPORT DELIVERY OF PETROLEUM PRODUCTS IN WAR CONDITIONS

O.M. Korobkova¹, L.A. Pavlovska², N.G. Shpak³

¹Ph. D., Associate Professor of Department «Exploitation of Ports and Cargo Operation Technologies»,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-2279-5820

²Ph. D., Professor of Department «Exploitation of Ports and Cargo Operation Technologies»,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-6856-7316

³Ph. D., Associate Professor of Department «Exploitation of Ports and Cargo Operation Technologies»,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-3765-1099

Summary

Introduction. The article explores key aspects of ensuring energy security in Ukraine under martial law, with a specific focus on the supply of diesel fuel, a strategic resource essential for the functioning of the economy and the defense sector. The urgency of addressing energy security issues stems from disruptions in traditional supply routes caused by the outbreak of full-scale military actions, which have necessitated rapid adaptation of Ukraine's transportation and logistics infrastructure. **Purpose.** The purpose of the study is to analyze the current challenges of supplying petroleum products to Ukraine, to assess the impact of new customs legislative initiatives, and to substantiate effective transportation and logistics solutions to maintain stable diesel imports during martial law. **Results.** The research highlights significant changes in the geography of petroleum product supplies after the start of hostilities, including the reorientation towards alternative supply chains and partnerships. The article examines new legislative changes regulating customs clearance for petroleum products, emphasizing their importance in accelerating border procedures and enhancing energy security. The advantages of using flexitanks as an alternative to traditional transportation methods are substantiated, including reduced logistics costs, increased flexibility, and improved operational convenience within the modified infrastructure conditions. Practical proposals for the optimization of petroleum product imports using modern logistical solutions are presented. **Conclusions.** Ensuring stable diesel supply under martial law requires a flexible, diversified logistics strategy and the rapid adaptation of infrastructure. The new legislative measures and alternative transportation technologies such as flexitanks significantly strengthen Ukraine's energy resilience during crises. The proposed logistics models provide practical tools for enhancing national energy security under conditions of prolonged instability.

Key words: energy security, diesel fuel, transportation and logistics infrastructure, petroleum products, customs procedures, flexitanks, alternative transportation, martial law, crisis logistics, Ukraine.

ІНФРАСТРУКТУРНІ ПРОБЛЕМИ ІМПОРТНИХ ПОСТАВОК
НАФТОПРОДУКТІВ В УМОВАХ ВІЙНИ

О.М. Коробкова¹, Л.А. Павловська², Н.Г. Шпак³

¹к. е. н., доцент кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0003-2279-5820

²к. е. н., доцент, професор кафедри
«Експлуатація портів і технологія вантажних робіт»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-6856-7316

³к. е. н., доцент кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-3765-1099

Анотація

Вступ. У статті розглянуто ключові аспекти забезпечення енергетичної безпеки України в умовах воєнного стану, особливий акцент зроблено на постачанні дизельного палива як стратегічного ресурсу, необхідного для стабільного функціонування економіки та сектору оборони. Актуальність дослідження зумовлена порушенням традиційних логістичних маршрутів внаслідок повномасштабних бойових дій, що вимагає оперативної адаптації транспортно-логістичної інфраструктури України. **Мета.** Метою дослідження є аналіз актуальних викликів у сфері постачання нафтопродуктів до України, оцінка впливу нових законодавчих ініціатив щодо митного оформлення та обґрунтування ефективних транспортно-логістичних рішень для забезпечення стабільного імпорту дизельного палива в умовах воєнного стану. **Результати.** У дослідженні висвітлено суттєві зміни в географії постачання нафтопродуктів після початку бойових дій, зокрема переорієнтацію на альтернативні логістичні ланцюги та міжнародну співпрацю. Проаналізовано нові законодавчі зміни щодо митних процедур оформлення нафтопродуктів та акцентовано їхню роль у прискоренні перетину кордону й підвищенні енергетичної безпеки. Обґрунтовано доцільність використання флексітанків як альтернативного методу транспортування, що забезпечує зниження логістичних витрат, підвищення гнучкості та зручності експлуатації в нових інфраструктурних умовах. Запропоновано практичні рішення для оптимізації імпорту нафтопродуктів із використанням сучасних логістичних технологій. **Висновки.** Для забезпечення стабільного постачання дизельного палива у воєнних умовах необхідні впровадження гнучкої, диверсифікованої логістичної стратегії та швидка адаптація інфраструктури. Запроваджені законодавчі зміни й використання альтернативних технологій транспортування, зокрема флексітанків, значно підсилюють енергетичну стійкість України в умовах кризи. Запропоновані логістичні моделі надають практичні інструменти для підвищення національної енергетичної безпеки в період тривалої нестабільності.

Ключові слова: енергетична безпека, дизельне паливо, транспортно-логістична інфраструктура, нафтопродукти, митні процедури, флексітанки, альтернативне транспортування, воєнний стан, кризова логістика, Україна.

Introduction. The challenges of ensuring Ukraine's economy and social sector with energy resources of sufficient quantity and quality represent one of the most critical issues for the country. Under conditions of martial law, the uninterrupted supply of diesel fuel to Ukraine is a vital factor for maintaining defense capabilities, the operation of critical infrastructure, and overall economic stability. The peculiarities of the of Ukrainian imports structure brings up the idea that it is necessary to reduce transportation costs when delivering fuel and energy products, which are the basis of the country's economic and energy security. In relation to them, the solutions are needed aimed at increasing the efficiency of transportation and foreign trade operations by applying more advanced methods of transportation.

Formulation of the problem. In the current conditions prevailing in the country, there is a need for a complete restructuring of previously arranged transport routes, strategies for customs brokerage management in import processes thorough justification and optimization.

Recent research and publications analysis. Most modern publications mainly highlight the economic and logistical problems of imported petroleum products transportation to Ukraine. For example, in paper [1] the challenges of the global petroleum products market and their impact on national security are considered. The publications [2-3] are devoted to the analysis of the main trends in the light petroleum products market in Ukraine. The papers [5-9] highlight the aspects of modeling supply chain costs for the delivery of foreign trade cargo in modern conditions. But unfortunately, few publications are devoted to the issue of finding new transport and technological solutions for providing Ukraine with petroleum products.

Target setting. The purpose of this article is to analyze the specific features of customs clearance procedures for diesel fuel imports, assess the effectiveness of the current measures aimed at simplifying customs procedures, and identify ways for their further improvement, as well as address infrastructure challenges related to the import delivery of petroleum products under martial law conditions.

Presentation of the main research material. An important role in the efficient organization of the cargo delivery process is played by the formation of a priority version of the infrastructure framework of cargo delivery schemes, considering customs-related factors which are necessary for a thorough study of the process. First, it should be noted that this study is based on the concept of "infrastructure framework of cargo delivery scheme", which was proposed by the authors in the previous study [10]. That is, the definition of the "infrastructure framework of the cargo delivery scheme" was taken as a basis, as a graphic representation of possible variants of transport and technological schemes for cargo delivery, which are formed according to the selected optimization criterion.

It can be argued that the configuration of the infrastructure framework of the delivery scheme depends to a greater extent on the geographical structure and volumes of cargo flows. Let us analyze these factors using the example of the import cargo flow of diesel fuel to Ukraine.

Since the beginning of the full-scale invasion, the Ukrainian fuel market has undergone such a structural geographical and transport-logistics transformation that no other country in the world has experienced. From March to July 2022, imports

moved from the eastern and northern to the western and southern borders. The Russian Federation and Belarus were replaced by Poland, Romania, Bulgaria, Turkey, Lithuania and their ports [4]. Thus, in recent years, fuel imports to Ukraine have been mainly along two approximately equivalent routes – Polish and Romanian. This refers to the point of crossing the Ukrainian border, rather than the origin of the fuel.

It is obvious that the Ukrainian oil products market is now fully oriented towards the European border. As a result, not only a geographical transformation has taken place on the Ukrainian market, but also a customs, transport and logistics one.

As is known, the most economical type of transportation for petroleum products transportation in large quantities is pipeline transport, in second place in terms of economies by scale comes sea transport, followed by rail. Before the war, large quantities of diesel fuel entered Ukraine mainly: via pipelines and by rail from the East. Then it was stored in large volumes at oil depots located throughout the country, then transported by road (gasoline trucks) to gas stations within the country. In other words, road transport was applied only for retail trade [2-4].

Since oil depots became one of the main targets of aggression, one of the main transport and logistics problems arose, namely the impossibility of accumulating a large cargo of diesel fuel at oil depots. Therefore, the geography of supplies has changed, the size of cargo lots has changed – all this has significantly affected transport logistics. More than 40% of imports began to arrive by road transport, while by 2022 this type of transportation did not exist at all in imports. In turn, the share of railways has decreased to 40-45% [3-4].

The market for light petroleum products is actively transforming. The speed of development of alternative supply channels directly depends on the right transport and technological solutions.

The problems immediately arose with the existing rolling stock: both in railway and road transport. The Ukrainian farmers proposed one of the possible solutions to this problem back in 2002. The farmers ship fairly large batches of grain and vegetable oils in twenty-foot equivalent units (TEU) for export by truck and rail. On the other hand, on the return journey, the containers usually travel empty. It is quite possible to apply special reusable flexi-tanks on the return journey to transport diesel fuel to Ukraine [11].

In the early 1990s, they were replaced by those made of thermoplastics, which resulted in a drop in prices. However, there was no significant expansion of the market until 2001, when the supply volume was about 5,000 units per year.

Also, in the early 1960s, the US military began to use flexi-tanks for the storage and transportation of diesel fuel. The transportation organization model is as follows. A flexi-tank is a soft container that can be placed on various means of transportation, it can be either a metal twenty-foot container, or a strong truck body, or a platform. It can hold a significant volume of liquid, while when folded it usually takes up to 2% of the volume it can hold. For example, one TEU can hold a flexi-tank with a volume of up to 20 m³ of diesel fuel, and when folded it is only about 0.3 m³ and can be transported for use on the way back. Flexi-tank (or flexible-tank) on the Ukrainian market is represented, as a rule, by imported disposable products, the price of which varies within USD 500.00. The disposable flexi-tanks are made of polyethylene or polyamide and are intended for single use for the transportation of safe bulk cargoes (Fig. 1).



Fig. 1. Traditional flexi-tank design

1 – partition with concave beams, 2 – multilayer material, 3 – 3-inch flange, 3 – 3-inch loading valve, 4 – Automatic Exhaust valve, 5 – paper roll, 6 – 20ft container

Unlike a traditional flexi tank, reusable special flexi-tanks should be used for the storage and transportation of dangerous goods, which include diesel fuel. There are a few companies on the world market that specialize in the production of reusable flexi-tanks. The price of the flexi-tank in this case will be higher, but the cost of operating flexi-tanks will ultimately be lower due to repeated use. A distinctive feature of such products is that flexi-tanks are made of a special polymer material, adapted for repeated use and resistant to almost any liquids; in particular (and this is one of the main features) – these are containers and reservoirs for the storage and transportation of oil and liquid petroleum products.

The world practice has proven that flexi-tanks are a more economical solution than tank-containers, barrels, IBCs (intermediate bulk containers) or cisterns (Table 1). As is evident from Table 1, loading 1 m³ of a flexi-tank requires less time than loading the same volume, for example, in cisterns, and therefore less time is required for the operation of the transfer pump and operators, respectively, electricity costs and operator wages are reduced. Using flexi-tanks reduces transportation and equipment rental costs, there is no need to pay for the return of the tank container or cistern, there is no need to clean the flexi-tank after unloading.

Table 1

Comparison of loading times for flexi-tank, IBC (per 1 TEU), barrels (per 1 TEU), tank container and cisterns

№	Parameter	Flexi-tank	IBC	Barrels	Tank container	Cistern
1	Number of cargo spaces per standard ISO container, units	1	18 *	80	–	–
2	Total capacity, m ³	24	~18.0	~16.0	~24.0	~60.0 *
3	Loading time, minutes	~30	~120	≥120	~30	~120*
4	Loading time per 1 m ³ , minutes	~1.25	~6.7	~7.5	~1.25	~2.0
5	Capacity per 1 cargo space, m ³	~24.0	1.0	0.20	~24.0	~60.0

* Typical loading – 18 IBCs of 1000 liters; a maximum of 20 units can fit.

* Estimated capacity of a railway cistern; a tanker truck typically has a capacity of ~30 m³.

* For a large cistern with a capacity of 70 m³, 2 hours is the assumed filling time; smaller volumes may load faster.

Source: developed by the authors based on [12-16].

It should be noted that flexi-tanks also have disadvantages: pumps are required for loading, flexi-tanks cannot be used in refrigerated containers. But despite this, flexi-tanks are a profitable alternative to barrels, IBCs, tank containers, and cisterns, especially in conditions of shortage of the latter. The widespread application of these technologies reduces the time and costs for cargo owners.

Of course, for such transportation, appropriate safety conditions must be met:

- drivers must undergo appropriate training and obtain a certificate,
- vehicle must be equipped with fire extinguishing equipment and other equipment in accordance with the requirements,
- periodic inspection of the integrity and degree of wear of flexi-tanks,
- use of duplicate layers to avoid fuel spillage beyond the container, vehicle body, etc.

In addition, it is necessary to consider the regulatory influence of the state on the importation and delivery of petroleum products under current conditions. This is particularly relevant to the detection of smuggling and counterfeit goods, which can not only cause economic losses but also pose threats to national security. The problems that arose at the beginning of the war during customs clearance of goods were related to the insufficient amount of time allocated for thorough document verification. Since customs clearance of cargo is limited to only four hours, customs officers faced difficulties in detecting falsifications, especially in cases where there were no obvious signs of forgery. During the customs clearance process, the customs authorities conducted document verification, including through requests to competent authorities of foreign states. In 2022–2023, numerous requests were sent to foreign authorities regarding the authenticity of documents and the country of origin of petroleum products.

Energy security is one of the key components of the national security of the state. The Law of Ukraine No. 3484-IX "On Minimum Stocks of Oil and Petroleum Products," which entered into force on December 24, 2024, is an important step towards implementing European standards in energy policy. Its adoption responds to the need to ensure the stability of Ukraine's energy sector and compliance with the requirements of the European Union [17]. The law mandates the creation and maintenance of strategic reserves of oil and petroleum products, which reduces risks associated with supply disruptions. This aligns with Directive 2009/119/EC, which requires EU member states to maintain minimum oil stocks equivalent to at least 90 days of average daily net imports [18].

One of the key aspects of the law's implementation is the introduction of an electronic reporting system that provides real-time monitoring of reserves. Similar systems operate in EU countries, including Germany and France, where they allow for effective control over strategic reserves and rapid response to crisis situations [19].

For the implementation of the law's provisions, the Cabinet of Ministers of Ukraine adopted Resolution No. 1455 dated December 20, 2024. This resolution establishes mechanisms for the creation, management, and operation of the minimum oil stock system. It regulates inventory accounting, procedures for their use, and the framework for interaction between state authorities and market participants. An important factor in the effective functioning of the system is the ability of the State Customs Service to ensure uninterrupted customs clearance of oil and petroleum products. In this context, the interaction of customs information systems with the electronic reporting system via an API interface plays a key role, minimizing the risk of delays in energy supply.

Further development of the system provides for its integration with international standards and the improvement of stock management mechanisms, taking into account best global practices.

The restoration of state market surveillance of non-food products in Ukraine, which began on January 1, 2025, represents an important stage in regulating the import of petroleum products. The key requirements for the unimpeded import of fuel include compliance with the Technical Regulation, the availability of a declaration of conformity, and a quality certificate marked with a conformity symbol. The study of this issue is of great importance for assessing the impact of new regulations on the petroleum products market, customs procedures, and the economy as a whole. The introduction of new requirements may lead to delays in customs clearance of petroleum products due to the need for additional inspections. According to Part 1 of Article 38 of the Law of Ukraine No. 2735-VI [20], selective sampling mechanisms may be applied, which will affect the speed of customs processing. On the one hand, this contributes to improving fuel quality and consumer safety; on the other hand, it creates potential barriers for importers due to the need to comply with the new requirements.

An important aspect is the efficiency of customs procedures and the adaptation of businesses to updated regulations, which requires further monitoring and analysis.

Nevertheless, such a solution will significantly reduce the cost of transportation, road congestion and shortage of diesel fuel supplies to Ukraine. The main advantage of such technology is the ability to transport diesel fuel directly from the points of departure without reloading, i.e. in a multimodal forwarding. But currently in Ukraine and the European Union this type of transportation is not sufficiently regulated and, accordingly, is not widely considered permitted, because diesel fuel is classified as dangerous goods (with a low degree of danger), the transportation of which has separate regulations.

At the same time, the transportation of diesel fuel in flexi-tanks is permitted in Australia and the countries of the Southern African Development Community (SADC) under special permits for the mining industry and agriculture both in standard containers and in grain truck bodies with a double (duplicating) layer for such flexi-tanks. Diesel fuel storage in flexi tanks is also quite common in Canada in the agricultural and mining industries.

Several companies with significant experience and relevant certificates for their products are involved in the production and supply of special flexi-tanks for transportation and storage of diesel fuel – FTS Flexi-tanks systems (Republic of South Africa), Musthane (France), Wiefferink (Netherlands) and others. That is, there is some experience in their effective production and application.

To solve the task of forming a priority version of the infrastructure framework of diesel fuel delivery schemes, various methods can be applied: both non-formalized and formalized and weakly formalized. In the previous study, we proposed an algorithm for modeling the infrastructure framework of cargo delivery schemes, which involves the application of a certain sequence of a complex of various methods [10]. The proposed algorithm involves the following sequence of stages:

1. At the stage of setting the research problem, i.e. formation of the possible options for the infrastructure framework of cargo delivery schemes, it is proposed to apply non-formalized methods (e.g. the morphological method or the collective idea generation method), as well as formalized methods (e.g. statistical analysis methods). It is at this

stage that the need to use specialized flexi-tanks for transporting diesel fuel is proven and possible options for the infrastructure framework of the scheme for delivering imported diesel fuel to Ukraine are formed.

2. At the stage of optimization, i.e. choosing a priority version for the infrastructure framework of cargo delivery schemes, it is advisable to apply formalized methods, which primarily include operations research methods (mathematical programming methods: linear, integer and dynamic programming), as well as weakly formalized methods (e.g. network planning methods and graph theory elements).

3. At the stage of analysis of the optimal variant of the infrastructure framework of cargo delivery schemes, the application of empirical methods is proposed, namely, a practical assessment of the adequacy of the obtained result.

The proposed algorithm can also be applied in this case to form the infrastructure framework of the diesel fuel delivery scheme.

Conclusions. Modern conditions require effective transport and technological solutions to substantiate the variants of schemes for the petroleum products delivery to Ukraine, in particular diesel fuel. The possibility and advantages of applying specialized reusable flexi-tanks for transporting diesel fuel in containers are proven. An algorithm for forming the infrastructure framework of diesel fuel delivery schemes is proposed, which involves the use of a complex of various methods. The impact of recent regulatory changes on the import and customs clearance process of petroleum products has been studied. In particular, the legislative amendments introduced special control procedures for the import of fuel. These measures enhance oversight of imports and prevent the entry of sanctioned or low-quality fuel into the market, while also requiring importers to adapt to stricter rules and prepare additional documentation.

BIBLIOGRAPHY

1. Donets D.M., Taranskyi I.P., Rykovanova I.S. Challenges of the global oil market and their impact on national security: prospects and risks. *Academic Visions*. 2024. No. 2. P. 1–12.
2. Kuzio N.Ye., Kosar N.S. Trends in the light oil market of Ukraine and prospects for energy security in this area. *Economics and Law*. 2023. No. 2. P. 60–70. DOI: <https://doi.org/10.15407/econlaw.2023.02.060>.
3. Kuiun Serhii. Will Ukraine have fuel in the winter? URL: https://enkorr.ua/ru/publications/chi_bude_ukrana_z_palnim_uzimku/255793 (accessed: 26.01. 2025).
4. Kuiun Serhii. Fuel market: what and why has changed? URL: <https://zn.ua/ukr/energetics/palivnij-rinok-shcho-i-chomu-zminilosja.html> (accessed: 26.01.2025).
5. Kolotvin R.Yu., Kharchuk O.G. Modern approaches to solving logistical problems of fuel imports in Ukraine during wartime. *Collection of research papers of the scientific and practical conference “Logistics and transport”*. Dnipro, October 6–7, 2023. P. 31–34.
6. Korobkova O.M., Pavlovska L.A., Shpak N.G. Modeling of logistics costs in supply chains of foreign trade cargoes. *Transport development*. 2023. No. 2(17). P. 133–142. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2023.2-17.11>.

7. Korobkova O., Pavlovska L., Shpak N. Improvement of the interaction algorithm of participants during customs and logistics service of cargo. *Collection of research papers of the Ukrainian State University of Railway Transport*. 2023. No. 203. P. 88–95.
8. Korobkova O.M. Logistics activities of enterprises in conditions of war. *Actual problems of modern science*. 2023. No. 4. P. 457–459.
9. Gonchar O., Kholodenko A., Shpak N. Optimization of Specific Custom Tariffs in the International Economic System. *13-th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT 2023)*, Wroclaw, Poland, September 21–23, 2023. IEEE 2023. ISBN 979-8-3503-1167-9. DOI: 10.1109/ACIT58437.2023.10275368.
10. Pavlovska L.A., Kyryllova O.V., Korobkova O.M., Shpak N.G. Peculiarities of modeling the infrastructure framework of cargo delivery schemes in modern conditions. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series «Technical science»s*. 2023. Vol. 34(73). No. 2. P. 172–179. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/29>.
11. Transportation of diesel fuel in flexi-tanks: Pro and Con. URL: <https://usm.media/perevozka-diztopлива-vo-fleksitankah-za-i-protiv/> (accessed: 22.02.2025).
12. Clover Chemical. Specifications of Flexitank Containers. 2022. URL: <https://www.cloverchemical.com/flexitank-specifications>.
13. Techno Group USA. Industrial Bulk Containers. 2023. URL: <https://www.technogroup.com/IBC-specifications>.
14. Savino Del Bene. Flexitanks: The Fast and Efficient Way to Transport Liquids. 2021. URL: <https://www.savinodelbene.com/flexitanks>.
15. Fluid Flexitanks. Efficiency of Bulk Liquid Transportation. 2020. URL: <https://www.fluidflexitanks.com/efficiency>.
16. ASF Logistics. Transportation Efficiency and Bulk Containers. 2021. URL: <https://www.asflogistics.com/bulk-containers>.
17. On Minimum Stocks of Oil and Petroleum Products : Law of Ukraine of 21 November 2023 No. 3484-IX. *Official Bulletin of Ukraine*. 2024.
18. Directive 2009/119/EC of the European Parliament and of the Council of 14 September 2009 imposing an obligation on Member States to maintain minimum stocks of crude oil and/or petroleum products. *Official Journal of the European Union*. 2009.
19. International Energy Agency. Oil Stockholding Systems in Europe. Paris : IEA, 2023.
20. On State Market Supervision and Control of Non-Food Products : Law of Ukraine of 2 December 2010 No. 2735-VI. *Official Bulletin of Ukraine*. 2011. No. 1.

REFERENCES

1. Donets, D. M., Taranskyi, I. P., & Rykovanova, I. S. (2024). Challenges of the global oil market and their impact on national security: prospects and risks [Chalendzhy hlobalnoho rynku nafty ta yikh vplyv na natsionalnu

- безпеку: перспекtyvy ta ryzyky]. *Academic Visions (Akademichni viziyi)*, (2), 1–12. [in Ukrainian].
2. Kuzio, N. Ye., & Kosar, N. S. (2023). Trends in the light oil market of Ukraine and prospects for energy security in this area [Tendentsii na rynku lehhykh naftoproduktiv Ukrainy ta perspektyvy enerhetychnoi bezpeky v tsii sferi]. *Economics and Law (Ekonomika ta Pravo)*, (2), 60–70. <https://doi.org/10.15407/econlaw.2023.02.060> [in Ukrainian].
 3. Kuiun, S. (2024, July 26). Will Ukraine have fuel in the winter? Retrieved from https://enkorr.ua/ru/publications/chi_bude_ukrana_z_palnim_uzimku/255793
 4. Kuiun, S. (2024, July 26). Fuel market: what and why has changed? Retrieved from <https://zn.ua/ukr/energetics/palivnij-rinok-shcho-i-chomu-zminilosja.html>
 5. Kolotvin, R. Yu., & Kharchuk, O. G. (2023). Modern approaches to solving logistical problems of fuel imports in Ukraine during wartime [Suchasni pidkhody do vyrishennia lohistychnykh problem importu paliwa v Ukrainu v umovakh voiennoho chasu]. In *Proceedings of the Scientific and Practical Conference “Logistics and Transport”* (pp. 31–34), Dnipro, October 6–7, 2023 [in Ukrainian].
 6. Korobkova, O. M., Pavlovska, L. A., & Shpak, N. G. (2023). Modeling of logistics costs in supply chains of foreign trade cargoes [Modeliuvannia lohistychnykh vytrat u lantsiuhakh postavok zovnishnotorhovelnykh vantazhiv]. *Transport Development*, 2(17), 133–142. <https://doi.org/10.33082/td.2023.2-17.11> [in Ukrainian].
 7. Korobkova, O., Pavlovska, L., & Shpak, N. (2023). Improvement of the interaction algorithm of participants during customs and logistics service of cargo [Vdoskonalennia alhorytmu vzaiemodii uchasnykiv pry mytnomu ta lohistychnomu obsluhovuvanni vantazhiv]. *Collection of Research Papers of the Ukrainian State University of Railway Transport*, (203), 88–95 [in Ukrainian].
 8. Korobkova, O. M. (2023). Logistics activities of enterprises in conditions of war [Loistychna diialnist pidpriemstv v umovakh viiny]. *Actual Problems of Modern Science*, (4), 457–459 [in Ukrainian].
 9. Gonchar, O., Kholodenko, A., & Shpak, N. (2023). Optimization of specific custom tariffs in the international economic system. In *13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT 2023)*, Wroclaw, Poland, September 21–23, 2023. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ACIT58437.2023.10275368>
 10. Pavlovska, L. A., Kyryllova, O. V., Korobkova, O. M., & Shpak, N. G. (2023). Peculiarities of modeling the infrastructure framework of cargo delivery schemes in modern conditions [Osoblyvosti modeliuvannia infrastruktury skhem dostavky vantazhiv v suchasnykh umovakh]. *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, 34(73)(2), 172–179. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/29> [in Ukrainian].

11. Transportation of diesel fuel in flexi-tanks: Pro and Con. (2024, July 26). Retrieved from <https://usm.media/perevozka-diztopliva-vo-fleksitankah-za-i-protiv/>
12. Clover Chemical. (2022). Specifications of Flexitank Containers. Retrieved from <https://www.cloverchemical.com/flexitank-specifications>
13. Techno Group USA. (2023). Industrial Bulk Containers. Retrieved from <https://www.technogroup.com/IBC-specifications>
14. Savino Del Bene. (2021). Flexitanks: The Fast and Efficient Way to Transport Liquids. Retrieved from <https://www.savinodelbene.com/flexitanks>
15. Fluid Flexitanks. (2020). Efficiency of Bulk Liquid Transportation. Retrieved from <https://www.fluidflexitanks.com/efficiency>
16. ASF Logistics. (2021). Transportation Efficiency and Bulk Containers. Retrieved from <https://www.asflogistics.com/bulk-containers>
17. Verkhovna Rada of Ukraine. (2023). Law of Ukraine "On Minimum Stocks of Oil and Petroleum Products" No. 3484-IX of 21 November 2023 [Zakon Ukrainy "Pro minimalni zapasy nafty ta naftoproduktiv" № 3484-IX vid 21 lystopada 2023 roku]. Official Bulletin of Ukraine, 2024 [in Ukrainian].
18. European Parliament and Council. (2009). Directive 2009/119/EC imposing an obligation on Member States to maintain minimum stocks of crude oil and/or petroleum products. Official Journal of the European Union, 2009.
19. International Energy Agency. (2023). Oil Stockholding Systems in Europe. Paris: IEA.
20. Verkhovna Rada of Ukraine. (2011). Law of Ukraine "On State Market Supervision and Control of Non-Food Products" No. 2735-VI of 2 December 2010 [Zakon Ukrainy "Pro derzhavnyi rynkuvyi nahliad i kontroli za neprodovolchymy tovaramy" № 2735-VI vid 2 hrudnia 2010 roku]. Official Bulletin of Ukraine, 1. [in Ukrainian].

**IMPROVEMENT OF OPERATIONAL AND REPAIR
CHARACTERISTICS OF CARGO TANK SURFACES OF BULK
TANKER-CHEMICAL CARGO VEHICLES BY IMPLEMENTING
HYBRID EPOXY-POLYURETHANE COATINGS**

O.O. Sapronov¹, V.L. Demchenko², D.O. Danylenko³, A.V. Sapronova⁴

¹D.Sc., Professor

Department of transport technologies and ship repair,
Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 000-0003-1115-6556

²D.Sc., Senior Researcher, Leading Researcher

Plastics Welding Department, E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy
of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-9146-8984

ORCID ID: 0000-0001-9146-8984

³Postgraduate

Department of transport technologies and ship repair,
Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0007-3311-9365

ORCID ID: 0009-0007-3311-9365

⁴PhD, Senior Researcher, Department of transport technologies and ship repair,

Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-4327-4293

ORCID ID: 0000-0002-4327-4293

Summary

Introduction. The tanker fleet plays a key role in the resource supply of the world's leading countries. At the same time, a significant part of the tanker surfaces is in contact with an aggressive environment, which leads to the course of corrosion processes and, as a result, a decrease in the strength of metal structures. This, in turn, can lead to tanker accidents and the risk of environmental pollution. Therefore, new hybrid paint coatings are needed for the reliable operation of the surfaces of ship cargo tanks. **Purpose.** Thus, the work aims to analyze the structure of polymer materials to create polymer coatings with optimal composition intended for protecting the surfaces of cargo tanks of bulk chemical tankers. **Results.** To create polymer coatings designed for the protection of ship cargo tanks, the ED-20 epoxy oligomer was selected as a binder, which was cured with hardeners based on aliphatic amines, in particular: polyethylene polyamine (PEPA), triethylenetetramine (TETA), canine 2609. The optimal content of ingredients for creating a hybrid epoxy coating was determined based on comprehensive studies of the structure and properties. To create a hybrid coating with optimal functional properties, it is advisable to use as a binder – epoxy oligomer ED-20 (100 pts.wt.), hardener polyethylene polyamine (10 pts.wt.), polyurethane varnish UR 294 (5-10 pts.wt.). **Conclusions.** Studying the structure and properties of the created materials made it possible to rationally combine the ingredients to obtain a hybrid coating with optimal properties. Based on the analysis of the obtained X-ray diffraction patterns of the studied samples, it was found that when polyurethane varnish UR 294 is introduced

in an amount of (5-10 pts.wt.) into the composition of the epoxy polymer, the average Bragg distance between the layers of molecular links of the epoxy polymer and PEPA increases. At the same time, the impact strength increases from 7.0 kJ/m² (epoxy matrix) to 11.1-12.0 kJ/m² (hybrid epoxy-polyurethane matrix). The developed hybrid polymer coatings can be used to improve the operational characteristics of cargo tanks of bulk chemical tankers.

Key words: *ship cargo tanks, epoxy oligomer, polyurethane varnish, hybrid coating, structure, impact strength.*

ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНО-РЕМОНТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХОНЬ ВАНТАЖНИХ ТАНКІВ НАЛИВНИХ ТАНКЕРІВ-ХІМОВОЗІВ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ ГІБРИДНИХ ЕПОКСИ-ПОЛІУРЕТАНОВИХ ПОКРИТТІВ

О.О. Сапронов¹, В.Л. Демченко², Д.О. Даниленко³, А.В. Сапронова⁴

¹д. т. н., професор, професор кафедри транспортних технологій і судноремонту,
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна,
ORCID ID: 000-0003-1115-6556

²д. х. н., старший дослідник, провідний науковий співробітник
відділу зварювання пластмас,
Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, Київ, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-9146-8984

³аспірант кафедри транспортних технологій і судноремонту,
Херсонська державна морська академія,
Херсон, Україна,
ORCID ID: 0009-0007-3311-9365

⁴доктор філософії, старший науковий співробітник
кафедри транспортних технологій і судноремонту,
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-4327-4293

Анотація

Вступ. Танкерний флот відіграє ключову роль у ресурсозабезпеченні провідних країн світу. При цьому значна частина поверхонь танкерів контактує з агресивним середовищем, що призводить до корозійних процесів та, як наслідок, зниження міцності металоконструкцій. Це своєю чергою може призвести до аварії танків та ризику забруднення навколишнього середовища. Тому для надійної експлуатації поверхонь судових вантажних танкерів виникає необхідність створення нових, гібридних лакофарбових покриттів. Отже, **метою** роботи є проведення аналізу структури полімерних матеріалів для створення оптимальних за складом полімерних покриттів, призначених для захисту поверхонь вантажних танків наливних танкерів-хімовозів. **Результати.** Для створення полімерних покриттів, призначених для захисту судових вантажних танків, у якості зв'язувача обрано епоксидний олігомер ЕД-20, який затверджували твердниками на основі аліфатичних амінів, зокрема: поліетиленполіамін (ПЕПА), триетилентетрамін (ТЕТА), Апсатіне 2609. На основі комплексних досліджень структури і властивостей визначено оптимальний вміст інгредієнтів для створення гібридного епоксидного покриття. Для створення оптимального за функціональними властивостями

гібридного покриття доцільно використовувати у якості зв'язувача епоксидний олігомер ЕД-20 (100 мас.ч.), твердник поліетиленполіамін (10 мас.ч.), поліуретановий лак УР 294 (5–10 мас.ч.). **Висновки.** Дослідження структури і властивостей створених матеріалів дало змогу раціонально поєднати інгредієнти для отримання гібридного покриття з оптимальними властивостями. На основі аналізу отриманих рентгенівських дифрактограм досліджуваних зразків виявлено, що при введенні поліуретанового лаку УР 294 у кількості (5–10 мас.ч.) до складу епоксидного полімеру відбувається зростання середньої Бреггівської відстані між шарами молекулярних ланок епоксидного полімеру та ПЕПА. При цьому відбувається підвищення ударної в'язкості з 7,0 кДж/м² (епоксидна матриця) до 11,1–12,0 кДж/м² (гібридна епокси-поліуретанова матриця). Розроблені гібридні полімерні покриття можливо використовувати для підвищення експлуатаційних характеристик вантажних танків наливних танкерів-хімовозів.

Ключові слова: суднові вантажні танки, епоксидний олігомер, поліуретановий лак, гібридне покриття, структура, ударна в'язкість.

Introduction. Tankers designed to transport oil and petroleum products play a strategic role and affect the resource supply of many countries. At the same time, bulk chemical tankers transporting oil and petroleum products face the problem of corrosion destruction of cargo tanks. Corrosion destruction leads not only to a decrease in the strength of structural materials but can also cause tanker accidents, lead to economic losses, and pose a risk to environmental pollution and vessel safety [1].

Statement of the problem. During the operation of cargo tanks of bulk chemical tankers, three main types of corrosion destruction are distinguished: general corrosion (the presence of a uniformly distributed layer of rust on the metal surface, which is a consequence of atmospheric exposure), pitting corrosion (the presence of deep defects in the form of cavities or pits that develop on the horizontal surfaces of cargo tanks), pitting corrosion (the presence of deep point damage, pitting) [2-4]. When transporting petroleum products, the lower part of the tanks is in contact with the cargo. The most aggressive component in crude oils is hydrogen sulfide (H₂S). Hydrogen sulfide is corrosive to steel, so pitting corrosion is possible. It should also be noted that high levels of free sulfur are formed near the breathing valves of cargo tanks, where there is a greater chance of oxygen entering. Sulfur, combined with water and oxygen, can lead to the formation of sulfuric acid (similar to the formation of sulfur oxide in an inert gas), which in turn leads to pitting corrosion in the lower part of the tank. Since the upper part of the tank is in contact with the gaseous atmosphere, general corrosion is possible [5, 6].

Analysis of recent research and publications. The protection of the surfaces of cargo tanks of bulk tankers from corrosion is generally a set of measures aimed at preventing and inhibiting corrosion processes, preserving and maintaining their performance during their operation. A combined method is the most effective method of protecting metal structures from corrosion. According to the requirements of the IMO (May 2010) [7], regarding the protection against corrosion of cargo oil tanks of tankers for the transportation of crude oil, the combined method involves the use of alloying elements for steels and the use of protective coatings, respectively. At the same time, using protective coatings on a polymer basis is relevant, and the list of these is quite

significant. Their use is due to high adhesive [8, 9], physical and mechanical [10, 11] properties, and resistance to the influence of aggressive external factors [12-14]. Therefore, when creating new polymer coatings intended to protect the surfaces of bulk chemical tank cargo tankers, selecting ingredients and considering their structural features and operating conditions is advisable.

Purpose: Analyzing the structure of polymer materials to create polymer coatings with an optimal composition intended to protect the surfaces of cargo tanks of bulk chemical tankers.

Presentation of the main material.

Materials and methods. To create polymer coatings intended for the protection of the surfaces of cargo tanks of bulk chemical tankers, the following ingredients were selected: binder-epoxy oligomer ED-20 (ISO 18280:2010), which was cured with various hardeners based on aliphatic amines, in particular, polyethylene polyamine (PEPA), triethylenetetramine (TETA), canine 2609. Among the most common hardeners (aromatic amines, acids, and anhydrides), aliphatic amines are characterized by an increased polymerization reaction rate at room temperature, determining their choice for experimental studies. Using aromatic amine hardeners, acids, and anhydrides involves elevated temperatures and increased time needed for the thermal crosslinking process.

Polyethylenepolyamine PEPA (TU 6-05-241-202-78) is an amine-type hardener that can cure materials at room temperature.

Triethylenetetramine TETA (TU 6-02-1099-83) is a cold-curing hardener that differs slightly from PEPA in the presence of amide groups.

Ancamine 2609 (Zhuzhou Polymer Co., Ltd., China). The hardener does not contain nonyl phenol. It is characterized by low viscosity, moisture resistance, and increased reactivity at low temperatures (268 K).

Polyurethane varnish UR 294 (TU 6-10-1462-84) was used to improve the properties of epoxy coatings. UR 294 results from the reaction of isocyanates ($R-N=C=O$) with reactive water molecules or unstable hydrogen atoms. It is characterized by resistance to the effects of dilute alkali solutions, weak acids, solvents, fuels and lubricants, and gasoline.

The formation of polymer materials was carried out according to works [11-13], with the following ratio of ingredients:

- 1) epoxy oligomer ED-20 (100 pts.wt.) + hardener polyethylenepolyamine (10 pts.wt.);
- 2) epoxy oligomer ED-20 (100 pts.wt.) + hardener triethylenetetramine (10 pts.wt.);
- 3) epoxy oligomer ED-20 (100 pts.wt.) + hardener Ancamine 2609 (10 pts.wt.).

The structural organization of polymers cured with different hardeners was studied by wide-angle X-ray diffraction on an XRD-7000 diffractometer (Shimadzu, Japan), the X-ray optical scheme of which was performed according to the Debye-Scherrer method for the passage of the primary beam through the sample under study, using CuK_{α} -radiation ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$) and a graphite monochromator [14]. The analyses were performed by automatic step-by-step scanning in the $U = 30 \text{ kW}$, $I = 30 \text{ mA}$ mode in the scattering angle range (2θ) from 3.0 to 40 degrees, the exposure time was 5 s. The temperature of the studies was $T = 293 \pm 2 \text{ K}$.

The surface images of the samples were taken on a scanning electron microscope REMM-102 AT SELMI manufactured in Sumy (Ukraine) (magnification $\times 800$ times,

operating voltage 15 kW) in the secondary electron mode. To obtain more precise information about the morphology of the fracture surface, the test samples were coated with carbon, and the coating thickness was 10–20 nm before the study.

Analysis of properties and structure of polymer materials. Based on the analysis of wide-angle X-ray diffraction patterns of the starting materials, it was found that the studied epoxy matrices polymerized with different hardeners have an amorphous structure (Fig. 1). According to the ratio of ED-20 + PEPA used when obtaining a network polymer, the central diffraction maximum ($2\theta_{\max} \approx 18.1^\circ$) indicates the existence of a close order during the translation in space of fragments of interstitial molecular links of ED-20, and the secondary maximum ($2\theta_{\max} \approx 5.4^\circ$) is characteristic of the PEPA hardener. The average value of the period d of close ordering of both types of interstitial molecular links (the average distance between the layers of these links in the volume) was determined according to the Wolf–Bragg equation:

$$d = \lambda(2\sin\theta_m)^{-1},$$

де λ – the wavelength of characteristic X-rays ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ for CuK_α – rays), are 4.89 \AA and 16.34 \AA , respectively.

The use of other hardeners (TETA and Ancamine 2609) during thermal crosslinking of the epoxy binder ED-20 provides a shift of the central diffraction maximum in intensity, which characterizes the features of the ED-20 structure to the region of smaller angles from $2\theta_{\max} \approx 18.1^\circ$ (for the hardener PEPA) to $2\theta_{\max} \approx 17.8^\circ$ (for the hardener TETA) and $2\theta_{\max} \approx 17.6^\circ$ (for the hardener Ancamine 2609). This indicates that as a result of the formation of epoxy polymers using different hardeners, the average Bragg distance between the layers of molecular links of the epoxy matrices is:

- $d \approx 4.89 \text{ \AA}$ – for PEPA hardener;
- $d \approx 4.97 \text{ \AA}$ – for TETA hardener;
- $d \approx 5.03 \text{ \AA}$ – for Ancamine 2609 hardener.

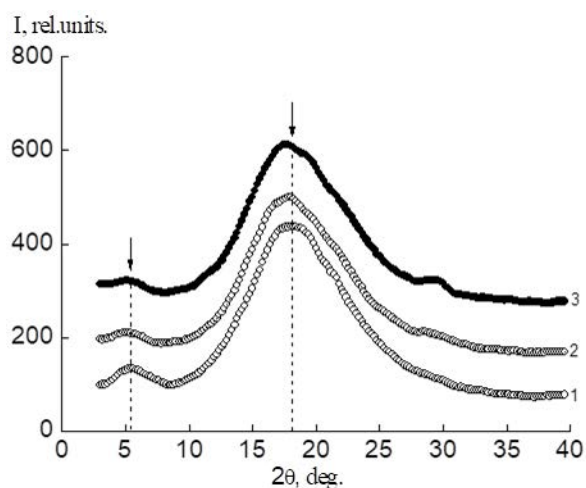


Fig. 1. Wide-angle X-ray diffraction patterns of epoxy samples cured with PEPA (1), TETA (2), and Ancamine 2609 (3)

It should be noted that when using different hardeners, the low-intensity diffraction maximum, which characterizes the features of their structure, has a different angular position. Accordingly, the average distance between the layers of PEPA units in the polymer volume is 16.34 Å, for TETA and Ancamine 2609 this value is 17.24 Å, respectively.

Thus, from the obtained results, it is possible to conclude that the smaller the average Bragg distance between the macromolecular chains of the epoxy resin during its curing, the greater the packing density of the macromolecular chains of the polymer. Therefore, a polymer matrix based on the epoxy oligomer ED-20 (100 pts.wt.) and the hardener PEPA (10 pts.wt.) was chosen for further experimental studies.

Analysis of the fracture surface of the polymer matrix at different magnifications (Fig. 2, a, b) allowed us to identify the mesh structure of the matrix, characterized by the uniformity of the facets. This indicates a uniform distribution of internal stresses and, consequently, the stability of the operational characteristics of such materials.

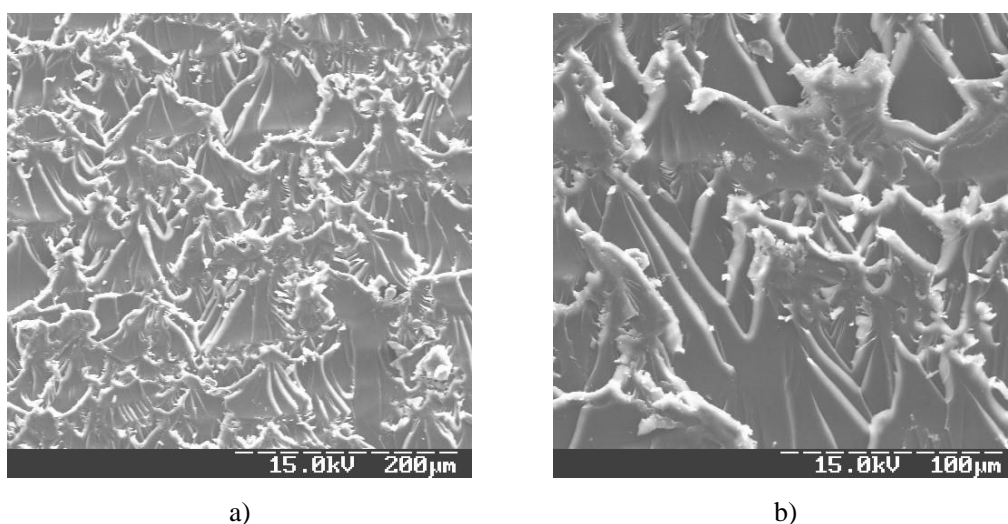


Fig. 2. Morphology of the epoxy matrix based on the epoxy oligomer ED-20 (100 pts.wt.) and the hardener PEPA (10 pts.wt.)

It should be noted that polymer coatings based on epoxy binders are characterized by improved adhesive and physicomechanical and stable chemical properties, which allows them to be used to protect vehicles, including the surfaces of cargo tanks of bulk chemical tankers. However, such coatings may contain structural defects in the form of pores. Such defects lead to the absorption and migration of water molecules and other substances (including oil product molecules) at the “coating-substrate” interface, which leads to corrosion of metal surfaces and delamination of coatings. In this case, the barrier characteristics of epoxy coatings can be improved by including a second phase, a liquid phase (in the form of a polyurethane binder), which reduces or inhibits the diffusion process of oxygen and molecules in an aggressive environment. Such an effect is associated with forming physical interpenetration of dissimilar binders without forming covalent bonds between polymer networks. At the same time, the polyurethane coating is characterized by low resistance to aggressive environments, particularly oil products.

The development of hybrid coatings based on epoxy and polyurethane binders is relevant to ensure barrier protection of the surfaces of cargo tanks of bulk chemical tankers. Therefore, at the next stage, the features of the change in the structure of polymers based on the epoxy binder ED-20 and the hardener PEPA, into the volume of which polyurethane varnish UR 294 was introduced in different mass ratios, were studied.

Based on the analysis of wide-angle X-ray diffraction patterns of the studied samples (Fig. 3), it was found that when $q = 5$ pts.wt. and $q = 10$ pts.wt. of polyurethane varnish UR 294 were added to the volume of epoxy polymer, a shift was observed in both the main and secondary diffraction maxima in intensity, which characterize the structure of epoxy resin ED-20 and hardener PEPA, to the region of smaller angles (Fig. 3, curves 1-3). At the same time, the average Bragg distance between macromolecular chains tends to increase for ED-20 from 4.89 Å (0 pts.wt.) to 4.92 Å (5 pts.wt.) and 5.00 Å (10 pts.wt.), and increases significantly for the PEPA hardener from 16.34 Å (0 pts.wt.) to 17.7 Å (5 pts.wt.) and 18.78 Å (10 pts.wt.).

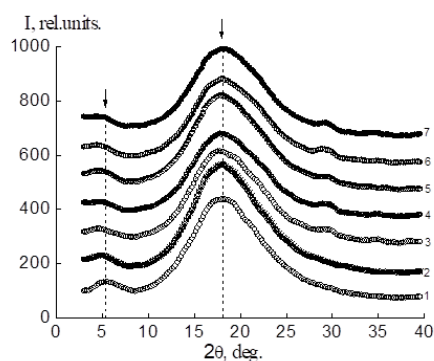


Fig. 3. Wide-angle X-ray diffraction patterns of epoxy polymer (1) modified with polyurethane varnish UR 294: 5 pts.wt. (2), 10 pts.wt. (3), 15 pts.wt. (4), 20 pts.wt. (5), 25 pts.wt. (6), 30 pts.wt. (7)

Further, an increase in the content of polyurethane varnish ($q = 15-30$ pts.wt.) in the epoxy polymer composition leads to a decrease in the average Bragg distance between the layers of ED-20 and PEPA molecular units compared to the sample containing 10 wt. parts of filler (Fig. 3, curves 4-7, table 1).

Table 1

Bragg distance between molecular units of samples

The content of UR 294 in the volume of the epoxy matrix, q , pts.wt.	$2\theta_m$, deg.	d , Å (ED-20)	$2\theta_m$, deg. (ED-20)	d , Å (PEPA)
0	18.1	4.89	5.4	16.34
5	18.0	4.92	5.0	17.70
10	17.7	5.00	4.7	18.78
15	17.9	4.95	5.1	17.32
20	17.9	4.95	5.1	17.32
25	18.1	4.89	5.1	17.32
30	18.2	4.86	5.1	17.32

Thus, by changing the content of polyurethane varnish UR 294 in the volume of the epoxy matrix, we observed a change in the structure and, therefore, the physical and mechanical properties of hybrid epoxy-polyurethane coatings (Fig. 4).

It is proven that the introduction of polyurethane varnishes UR 294 at a content of $q = 5-10$ pts.wt. provides a monotonic increase in impact strength from $W = 7$ kJ/m² to $W = 11.1-12.0$ kJ/m². It was assumed that polyurethane varnish UR-294, which has isocyanate groups (R-N=C=O), can interact with the epoxy oligomer's hydroxyl groups, which increases impact strength by 1.5-1.7 times. The increase in mechanical characteristics is primarily associated with chemical interaction, which affects structural changes – a change in the length between the layers of molecular links consistent with the results of wide-angle radiography (Fig. 3).

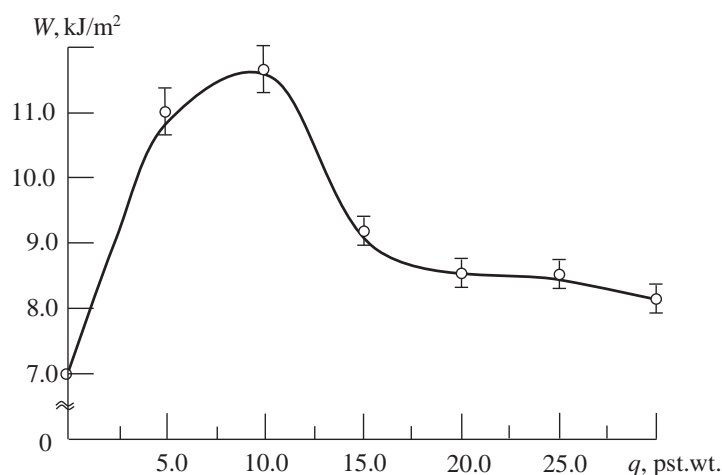


Fig. 4. Dependence of the impact strength (W) of the hybrid polymer matrix on the content of polyurethane varnish UR-294

The following was observed when forming experimental samples with different polyurethane varnish contents. Unlike epoxy samples with a content of $q = 5-15$ pts.wt. of UR 294, which were polymerized at room temperature $T = 293$ K for $\tau = 12$ h, samples with a content of $q = 20-30$ pts.wt. of UR 294 were partially polymerized (under the same conditions). The obtained effect can be explained by the fact that polyurethane varnish UR 294 at an increased content prevents the hardening of the epoxy binder. This is due to the presence of flexible polymer macromolecules and chain segments in the molecular structure and the structure of the branched chain. Thus, the contact area between the epoxy ring and the hardener is reduced, so the complete hardening of the polymer occurred after thermal treatment under previously established temperature-time conditions [11-13].

Additionally, the nature of the microfracture of the surface of hybrid epoxy-polyurethane materials was analyzed (Fig. 5). The fracture surface of samples characterized by maximum impact toughness values was previously investigated (Fig. 5, a, b). A curved fracture trajectory of hybrid epoxy-polyurethane materials was established, which indicates an increase in the time and resistance to fracture under the influence of impact loading [15]. It was assumed that under the influence of an external load, the main epoxy chain deforms under

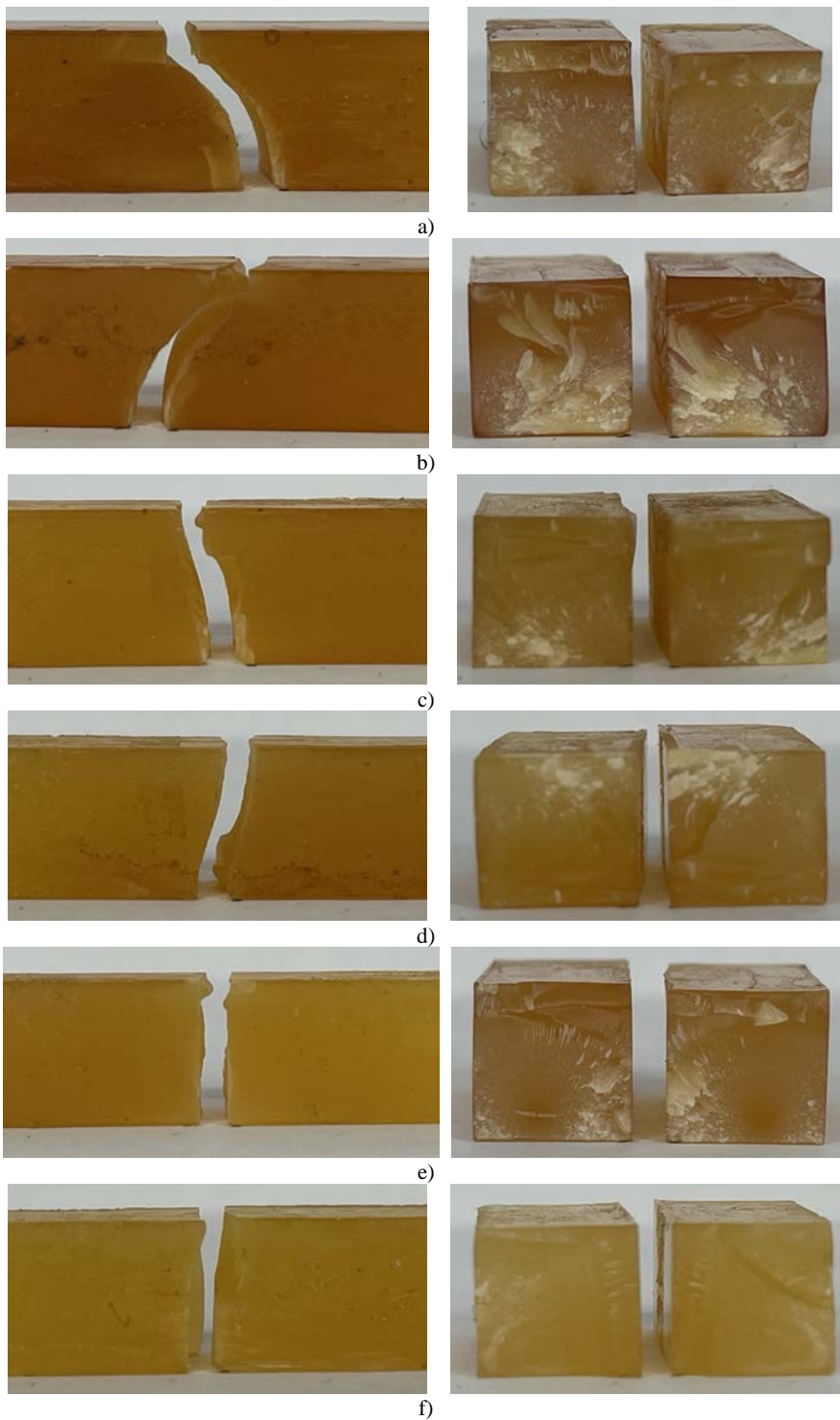


Fig. 5. Type of epoxy composites microfracture with different polyurethane varnish contents UR-294, q, wt. parts: a) 5.0; b) 10.0; c) 15.0; d) 20.0; e) 25.0; f) 30.0

the action of the applied force. Then, the interpenetrating chain of the polyurethane varnish provides a partial plasticizing effect. The synergistic effect in the form of rigidity (epoxy chain) and moderate plasticizing action (polyurethane varnish chain), when reaching maximum stresses in the polymer, provides rapid formation and growth of internal defects until the moment of fracture. In this case, a fracture surface was observed with areas of loose origin with a complex heterogeneous structure (Fig. 5, a, b).

Meanwhile, hybrid epoxy-polyurethane materials with a higher content of polyurethane varnish UR-294 (Fig. 5, c-f) showed a more gentle fracture. This is due to the ratio of epoxy binder and polyurethane varnish. In this case, the increase in the plasticizing effect of the polymer is directly related to the yield point, the decrease of which provides elastic-plastic deformation. At the same time, the fracture surface of such materials is characterized by structural heterogeneity and leads to a rapid, viscoelastic fracture in the region of maximum stresses. This affects the strength characteristics of hybrid materials.

Conclusion. Based on studies of the structure of epoxy matrices polymerized with various amine hardeners, it was found that to improve the operational and repair characteristics of the surfaces of cargo tanks of bulk chemical tankers, it is advisable to use a polymer matrix based on the epoxy oligomer ED-20 (100 pts.wt.) and the hardener PEPA (10 pts.wt.). Analysis of the morphology of the polymer matrix allowed us to identify its homogeneity. In such materials, the smallest (among the studied matrices) average Bragg distance between the layers of molecular links of the matrix was observed – $d \approx 4.89 \text{ \AA}$. This indicates a densification of the polymer network, which provides improved material characteristics.

The mechanical strength and fracture pattern of epoxy matrices modified with polyurethane varnish UR-294 under impact loading were studied. It was found that the maximum impact strength value – $W = 12.0 \text{ kJ/m}^2$ is characteristic of hybrid coatings containing epoxy oligomer ED-20 – 100 pts.wt., hardener polyethylenepolyamine – 10 pts.wt., polyurethane varnish UR 294 – 10 pts.wt. Microfracture analysis of hybrid epoxy-polyurethane materials obtained using optical microscopy allows us to state that the increase in impact strength is associated with the chemical interaction of isocyanate groups of polyurethane varnish with hydroxyl groups of the epoxy oligomer. Due to the presence of flexible macromolecules and branched polymer segments of polyurethane varnish UR 294 in the material structure, the contact area between the epoxy ring and the hardener decreases, slowing the hardening process. A plasticizing effect of polyurethane varnish is created, affecting cracks' growth and propagation. In this case, the hybrid polymer's relatively high fracture energy is required for crack propagation. This makes it possible to use the developed hybrid epoxy-polyurethane coatings to protect the surfaces of cargo tanks of bulk chemical tankers.

REFERENCES

1. Guedes Soares, C., Garbatov, Y., Zayed, A., Wang, G. (2008) Corrosion wastage model for ship crude oil tanks. *Corrosion Science*, 50 (11): 3095–3106. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.08.035>
2. Soares, C. G., Garbatov, Y., Zayed, A., & Wang, G. (2009) Influence of environmental factors on corrosion of ship structures in marine atmosphere. *Corrosion Science*, 51(9): 2014–2026. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.05.028>

3. Gardiner, C.P., Melchers, R.E., Enclosed atmospheric corrosion in ship spaces, *British Corrosion Journal*, 36 (4): 272–276. <https://doi.org/10.1179/000705901101501730>
4. Satheesh Babu P.K., Mathiazhagan, A., Nandakumar, C.G. (2014) Corrosion Health Monitoring System for Steel Ship Structures, *International Journal of Environmental Science and Development*, 5(5): 491–495. DOI: 10.7763/IJESD.2014.V5.533
5. Garbatov, Y., Guedes Soares, C., & Wang, G. (2007) Nonlinear Time Dependent Corrosion Wastage of Deck Plates of Ballast and Cargo Tanks of Tankers. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 129(1): 48–55. <https://doi.org/10.1115/1.2426987>
6. Gardiner, C.P., Melchers R.E. (2001) Enclosed atmospheric corrosion in ship spaces. *British Corrosion Journal*, 36 (4): 272–276. <https://doi.org/10.1179/000705901101501730>
7. International Maritime Organization. 2010, “Performance Standard for Alternative Means of Corrosion Protection. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.289\(87\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.289(87).pdf)
8. Buketov, A., Maruschak, P., Saponov, O., Zinchenko, D., Yatsyuk, V., Panin, S. (2016) Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites. *Transport*, 31(3): 333–342. DOI: 10.3846/16484142.2016.1212267
9. Saponov, O., Maruschak, P., Buketova, N., Leschenko, O., Panin, S. (2016) Investigation of Pm-75 Carbon Black Addition on the Properties of Protective Polymer Coatings. *Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures*, 1783: 020194-1–020194-4. DOI: 10.1063/1.4966488
10. Stukhlyak, P.D., Moroz, K.M. (2011). Influence of porosity in the epoxy matrix-polyvinyl alcohol-disperse filler system on the impact toughness. *Mater. Sci*, 46(4): 455–463. <https://doi.org/10.1007/s11003-011-9312-x>
11. Dobrotvor, I.G., Stukhlyak, P.D., Mykytyshyn, A.G., et al. (2021) Influence of Thickness and Dispersed Impurities on Residual Stresses in Epoxy Composite Coatings. *Strength Mater.*, 53: 283–290. <https://doi.org/10.1007/s11223-021-00287-x>
12. Buketov, A., Saponov, O., Klevtsov, K., Kim, B. (2023) Functional Polymer Nanocomposites with Increased Anticorrosion Properties and Wear Resistance for Water Transport. *Polymers*, 15: 3449. <https://doi.org/10.3390/polym15163449>
13. Panda, A, Dyadyura, K, Valíček, J, Harničárová, M, Kušnerová, M, Ivakhniuk, T, Hrebnyk, L, Saponov, O, Sotsenko, V, Vorobiov, P, Levytskyi, V, Buketov, A, Pandová, I. (2022) Ecotoxicity Study of New Composite Materials Based on Epoxy Matrix DER-331 Filled with Biocides Used for Industrial Applications. *Polymers*, 14(16): 3275. <https://doi.org/10.3390/polym14163275>
14. Demchenko, V., Riabov, S., Shtompel' V. (2017) X-ray study of structural formation and thermomechanical properties of silver-containing polymer nanocomposites. *Nanoscale Research Letters*, 12: 235–240. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-1967-2>
15. L. Pan, J. Ban, S. Lu et al. (2015) Improving thermal and mechanical properties of epoxy composites by using functionalized graphene. *RSC Advances*, 5 (74): 60596–60607. <https://doi.org/10.1039/C5RA09410K>

НОТАТКИ

Наукове видання

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

Випуск 2(25), 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. 14,35.
Замов. № 0725/606. 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
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.

Scientific publication

TRANSPORT DEVELOPMENT

Scientific journal

Issue 2(25), 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 14,35.
Order No 0725/606. Edition of 200 copies.

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