

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

ВИПУСК 3(18), 2023

Заснований у жовтні 2016 року



Видавничий дім
«Гельветика»
2023

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

№ 3(18)
2023

Заснований у жовтні 2016 року

Виходить 4 рази на рік

Свідоцтво Міністерства юстиції України
про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
Серія КВ № 22494-12394 ПР від 04.10.2016 р.

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») у галузі економічних та технічних наук (051 – Економіка, 073 – Менеджмент, 133 – Галузеве машинобудування, 271 – Морський та внутрішній водний транспорт, 275 – Транспортні технології (за видами)).

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 – к.т.н., доц. *Немчук О.О.*
Відповідальний секретар – д.т.н., доц. *Мінчев Д.С.*

Члени редакційної колегії:

д.т.н., проф., *Варбанець Р.А.*, ОНМУ;
д.т.н., проф., *Дубровський М.П.*, ОНМУ;
д.т.н., проф., *Єзупов К.В.*, ОНМУ;
д.е.н., професор, *Постан М.Я.*, ОНМУ;
д.т.н., проф., *Кириллова О.В.*, ОНМУ;
д.е.н., проф., *Лапкіна І.О.*, ОНМУ;
д.т.н., проф., *Пітерська В.М.*, ОНМУ;
д.т.н., проф., *Малаксіано М.О.*, ОНМУ;
к.е.н., доц., *Мельников С.В.*, ОНМУ;
Філіна-Давидович Л.С., д.т.н., Західнопоморський технологічний університет, Щецин, Польща;
Аймелек Мурат, PhD, Ізмірський Університет імені Катіпа Челебі, Туреччина;
Малекі Вішкаї Бехзад, PhD, Вільний міжнародний університет соціальних досліджень імені Гвідо Карлі, Італія;
Колмикова Анна, DSc, Бременський університет, Німеччина;
Любомиров Слав 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 Міл, 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.

Рекомендовано до друку Вченою радою
Одеського національного морського університету
(протокол № 2 від 28.09.2023 р.)

Відповідальність за достовірність фактів, цитат, власних імен, географічних назв, назв підприємств, організацій, установ та іншої інформації несуть автори статей.

Висловлені у цих статтях думки можуть не збігатися з точкою зору редакційної колегії, не покладають на неї ніяких зобов'язань.
Передруки і переклади дозволяються лише за згодою автора та редакції.

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

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

ODESSA
NATIONAL MARITIME UNIVERSITY

TRANSPORT DEVELOPMENT

Scientific journal

ISSUE 3(18), 2023

Founded in October 2016



Publishing House
"Helvetica"
2023

ODESSA
NATIONAL MARITIME UNIVERSITY
TRANSPORT DEVELOPMENT
SCIENTIFIC JOURNAL

№ 3(18)
2023

Founded in October 2016

Frequency: four times a year

Certificate of state registration of the print media issued by the Ministry of Justice of Ukraine
Series KB № 22494-12394 IIP dated 04.10.2016

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”) in the field of economic and technical sciences
(051 – Economics, 073 – Management, 133 – Industry engineering,
271 – Maritime and inland transport, 275 – Transport technologies (by type).

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: PhD in Engineering, Associate Professor *Nemchuk O.O.*
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., *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.

Recommended for printing by the Academic Council of Odessa National Maritime University
(Minutes No 2 dated September 28, 2023)

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

The Editorial Board may not share the authors' opinion

and assumes no responsibility for the content of manuscripts.

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

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

З М І С Т

ЕКОНОМІКА

В.Ф. Гарькава

Управління логістикою відповідно до попиту на пасажирські та вантажні перевезення з появою штучного інтелекту (досвід для України) 9

V.V. Zhykharieva, O.V. Koretska, Yu.V. Delik

Evaluation of cargo ships construction prices and their impact on insurance costs24

С.В. Мельников

Аналіз стійкості в дуополії Курно – Бертрана з диференційованими продуктами.....37

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Г.Л. Ватуля, А.О. Ловська, Є.С. Краснокутський, С.В. Дериземля

Моделювання поперечної навантаженості контейнера зі стінами із сендвіч-панелей, розміщеного на вагоні-платформі.....50

МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

Nameer Hashim Qasim, Aqeel Mahmood Jawad, Muthana Hameed Majeed

The usages of cybersecurity in marine communications.....59

М.С. Агєєв, С.М. Устінцев

Особливості формування газотермічних покриттів у разі відновлення робочих поверхонь деталей судових технічних засобів.....76

А.Д. Бойко

Оцінка ефективності методів управління ризиками виникнення аварійних морських подій і запобігання їм..... 85

O.S. Bolgov

Determination of the optimal cargo operations strategy of a bulk carrier vessel, with continuous ensuring its seaworthiness.....100

А.І. Головань

Методи кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден..... 113

І.П. Гончарук, А.І. Головань

Виконання автоматизованих швартовних операцій між суднами: дослідження кібербезпеки.....123

Б.О. Єрмоленко

Аналіз процесу навігації та планування шляху автономного надводного судна.....138

М.А. Пирисунько, А.А. Андрєєв, Д.О. Шалапко Ефективність охолодження повітря на вході суднового двигуна із системою рециркуляції відпрацьованих газів ежекторною та абсорбційною холодильними машинами.....	149
Д.О. Шалапко, А.А. Андрєєв, М.А. Пирисунько Вплив на експлуатаційні показники головного двигуна 9L48/60В танкера використання водневих добавок до основного палива.....	160
Є.Л. Шкурко Технологічні рішення для підвищення продуктивності вантажно-розвантажувальних робіт на LNG-терміналах у морських портах.....	169
С.О. Яремчук, І.З. Маслов Розвиток фахових компетентностей курсантів-судномеханіків: фізичний експеримент, ChatGPT та аналіз застосування пірометрів у судових системах.....	179

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

Н.Т. Кунда, Д.Д. Наумовець Логістичний підхід до оптимізації міжнародних автомобільних перевезень.....	196
Г.О. Примаченко, О.В. Шкуренко, В.А. Будник, Є.І. Григорова Апарат методології наукових досліджень системи мультимодальних перевезень.....	209

C O N T E N T S

ECONOMY

V.F. Harkava

Logistics management in accordance with the demand
for passenger and freight transportation with the advent
of artificial intelligence (experience for Ukraine)9

V.V. Zhykharieva, O.V. Koretska, Yu.V. Delik

Evaluation of cargo ships construction prices
and their impact on insurance costs24

S.V. Melnikov

Stability analysis in a Cournot – Bertrand duopoly with differentiated products.....37

INDUSTRIAL MECHANICAL ENGINEERING

G.L. Vatulia, A.O. Lovska, Ye.S. Krasnokutskyi, S.V. Deryzemlia

Modeling of the transversal loading of a container with sandwich
panels walls placed on a platform car.....50

MARITIME AND INLAND TRANSPORT

Nameer Hashim Qasim, Aqeel Mahmood Jawad, Muthana Hameed Majeed

The usages of cybersecurity in marine communications.....59

M.S. Ahieiev, S.M. Ustintsev

Features of the formation of gas thermal coatings in the restoration
of the working surfaces of ship equipment parts.....76

A.D. Boiko

Assessment of efficiency of methods of risk management
and prevention of maritime accidents.....85

O.S. Bolgov

Determination of the optimal cargo operations strategy of a bulk carrier vessel,
with continuous ensuring its seaworthiness.....100

A.I. Golovan

Methods for quantifying the efficiency of cargo ship maintenance systems.....113

I.P. Honcharuk, A.I. Golovan

Automated ship to ship docking: a cybersecurity study.....123

B.O. Yermolenko

Analysis of the navigation and path planning process
of an autonomous surface vessel.....138

M.A. Pyrysunko, A.A. Andreiev, D.O. Shalapko

Efficiency of air cooling at the inlet of a marine engine
with an exhaust gas recirculation system by ejector
and absorption refrigeration machines.....149

D.O. Shalapko, A.A. Andreiev, M.A. Pyrysunko Influence of hydrogen additives to the principal fuel on the performance of the main engine of the 9L48/60B tanker.....	160
Ye.L. Shkurko Technological solutions for enhancing productivity of cargo handling operations at LNG terminals in maritime ports.....	169
S.O. Yaremchuk, I.Z. Maslov Development of professional competencies among cadet-ship mechanics: physical experiment, ChatGPT, and analysis of the use of pyrometers in ship systems.....	179

TRANSPORT TECHNOLOGIES (BY TYPE)

N.T. Kunda, D.D. Naumovets Logistics approach to optimization of international road transportation.....	196
H.O. Prymachenko, O.V. Shkurenko, V.A. Budnyk, Ye.I. Hryhorova Methodology apparatus of scientific studies of the system of multimodal transportation.....	209

ЕКОНОМІКА

УДК 330.341.1:656.2(477)

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2023.3-18.01>

УПРАВЛІННЯ ЛОГІСТИКОЮ ВІДПОВІДНО ДО ПОПИТУ НА ПАСАЖИРСЬКІ ТА ВАНТАЖНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ З ПОЯВОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ (ДОСВІД ДЛЯ УКРАЇНИ)

В.Ф. Гарькава

д.е.н., доцент, ректор,

Міжнародний класичний університет імені Пилипа Орлика, Миколаїв, Україна,

ORCID ID: 0000-0003-3033-8515

Анотація

Вступ. Дослідження спрямоване на визначення потенційної можливості оптимізації транспортно-логістичної галузі України за допомогою штучного інтелекту. Реалізація системних організаційних рішень на основі штучного інтелекту, зокрема для прогнозування та задоволення попиту на пасажиро- та вантажоперевезення, може сприяти технологічно-економічній оптимізації галузі. **Мета.** Метою статті є проведення прогностно-статистичного оцінювання впливу системних рішень з інтеграції штучного інтелекту в транспортно-логістичну галузь України. Використання системних моделей та інструментів штучного інтелекту, що ґрунтуються на глибокому машинному навчанні, дає можливість прогнозувати та оптимізувати розвиток галузі. **Результати.** Результати дослідження вказують на потенційну можливість впровадження системних рішень з використанням штучного інтелекту в транспортно-логістичній галузі України. Ці рішення можуть призвести до позитивних зрушень в транспортній сфері, включаючи можливість зупинити тривалий період рецесії. Результати дослідження мають практичні наслідки для формування механізмів та організаційно-технологічних рішень з впровадженням новітніх технологій четвертої хвилі індустріального розвитку та глобальної цифровізації. **Висновки.** На основі проведеного аналізу та моделювання прогнозів можна зробити висновок, що впровадження штучного інтелекту в транспортно-логістичну галузь України має потенціал для покращення ефективності та оптимізації процесів пасажиро- та вантажоперевезень. Запропонована модель і, зокрема, інструментарій застосування засобів штучного інтелекту на основі глибокого машинного навчання, можуть стати основою для подальшого розвитку транспортної галузі України. В майбутньому важливо провести додаткові дослідження, для подальшого розвитку моделі прогнозування та оптимізації, зокрема для створення більш точних моделей прогнозування попиту на пасажирські та вантажні перевезення. Розвиток технологій штучного інтелекту та використання нових алгоритмів машинного навчання можуть допомогти вдосконалити прогностні моделі та їх застосування в транспортно-логістичній галузі.

Ключові слова: штучний інтелект, транспортно-логістична галузь, прогнозування попиту, оптимізація технологічно-економічних процесів, глибоке машинне навчання.

**LOGISTICS MANAGEMENT IN ACCORDANCE WITH THE DEMAND
FOR PASSENGER AND FREIGHT TRANSPORTATION WITH THE ADVENT
OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE (EXPERIENCE FOR UKRAINE)**

V.F. Harkava

Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, Rector,
Pylyp Orlyk International Classical University, Mykolaiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-3033-8515

Summary

Introduction. The research aims to determine the potential for optimizing the transportation and logistics industry in Ukraine using artificial intelligence. The implementation of systematic organizational solutions based on artificial intelligence, particularly for forecasting and meeting the demand for passenger and freight transportation, can contribute to the technological and economic optimization of the industry. **Objective (Aim).** The objective of this article is to conduct a forecast-statistical assessment of the impact of integrating artificial intelligence into the transportation and logistics sector in Ukraine. The use of systemic models and artificial intelligence tools based on deep machine learning enables the prediction and optimization of industry development. **Results.** The results of the study indicate the potential for implementing systemic solutions using artificial intelligence in Ukraine's transportation and logistics industry. These solutions can lead to positive developments in the transportation sector, including the possibility of overcoming an extended period of recession. The research findings have practical implications for the development of mechanisms and organizational technological solutions for the implementation of advanced technologies in the fourth wave of industrial development and global digitalization. **Conclusions.** In conclusion, the introduction of artificial intelligence in Ukraine's transportation and logistics sector has the potential to enhance efficiency and optimize passenger and freight transportation processes. The proposed model and tools for implementing artificial intelligence, particularly based on deep machine learning, can serve as a foundation for further development in the transportation industry. Future research should focus on improving forecast-optimization models, including the development of more accurate models for predicting demand for passenger and freight transportation. Advancements in artificial intelligence technology and the use of new machine learning algorithms can help refine forecast models and their application in the transportation and logistics industry.

Key words: artificial intelligence, transportation and logistics industry, demand forecasting, optimization of technological and economic processes, deep machine learning.

Вступ. Дослідження оптимізації управління логістикою в контексті пасажирських і вантажних перевезень є актуальними і важливими для України з появою можливостей штучного інтелекту з таких причин:

1. Підвищення ефективності: управління логістикою використовується для оптимізації руху пасажирів і вантажів з одного місця в інше. Застосування штучного інтелекту в цій сфері може значно покращити ефективність процесів.

Наприклад, штучний інтелект може аналізувати дані про попит, прогнозувати потреби у перевезеннях, визначати найбільш ефективний маршрут і розподіляти ресурси відповідно [1–3].

2. Зниження витрат: оптимізація логістичних процесів за допомогою штучного інтелекту може принести значні економічні вигоди. Скорочення часу транспортування, оптимізація використання транспортних засобів і зниження витрат на паливо призводять до економії коштів для перевізників і пасажирів [4–6].

3. Покращення безпеки: штучний інтелект може допомогти вдосконалити системи безпеки пасажирських і вантажних перевезень. Він може аналізувати дані про безпекові ризики, прогнозувати можливі аварійні ситуації та запропонувати заходи щодо їх запобігання. Також штучний інтелект може допомогти контролювати безпекові вимоги і стандарти на всіх етапах перевезень [7–9].

4. Адаптація до змін: управління логістикою з використанням штучного інтелекту дає можливість швидко реагувати на мінливі умови, такі як зміна попиту, стан доріг і кліматичні чинники. Системи штучного інтелекту можуть адаптуватися до нових умов і вживати необхідні заходи для забезпечення ефективності та надійності перевезень [10–12].

5. Конкурентоспроможність: успішне впровадження штучного інтелекту в управління логістикою може забезпечити конкурентну перевагу для перевізників та логістичних компаній. Високоєфективні та інноваційні системи логістики можуть привернути нових клієнтів і забезпечити задоволення їхніх потреб [13–15].

Загалом, управління логістикою з використанням штучного інтелекту є актуальним дослідженням для України, оскільки воно може покращити ефективність перевезень, знизити витрати, забезпечити безпеку і підвищити конкурентоспроможність на ринку. Дослідження є важливими для впровадження інноваційних рішень та сталого розвитку логістичних систем відповідно до потреб сучасного суспільства.

Постановка проблеми. Україна, як країна з великим обсягом пасажирських і вантажних перевезень, стикається з низкою проблем, які впливають на ефективність, безпеку та вартість перевезень. Традиційні методи управління логістикою мають обмеження і не можуть оптимально вирішити ці проблеми [16–18].

Одна з основних проблем полягає в нестабільності попиту на перевезення. Пасажирські та вантажні потоки можуть змінюватися залежно від сезону, святкових періодів, економічної ситуації та інших чинників. Традиційні методи планування можуть бути недостатньо гнучкими для ефективного реагування на зміни в попиті та прогнозування майбутніх потреб [19].

Другою проблемою є складність оптимізації маршрутів і розподілу ресурсів. Управління великими мережами пасажирських транспортних засобів або логістичних ланцюгів вантажоперевезень вимагає врахування багатьох чинників, таких як відстань, трафік, час, обсяги перевезень та інші обмеження. Ручне планування може бути часо- та ресурсомістким, а також схильним до помилок [20].

Третя проблема пов'язана з безпекою перевезень. Нестача розуміння та аналізу потенційних ризиків може призвести до аварій, втрати товарів, порушення графіків та загроз для безпеки пасажирів. Традиційні системи безпеки можуть бути не в змозі передбачити надзвичайні ситуації та вжити відповідних заходів безпеки, які можуть бути недостатньо ефективними або реактивними [21].

Отже, постановка проблеми полягає в необхідності вивчення та впровадження штучного інтелекту в управління логістикою пасажирських і вантажних перевезень в Україні.

Формулювання цілей статті. Мета цієї статті – статистично та аналітично оцінити можливий вплив впровадження штучного інтелекту, що працює за принципом задоволення попиту на пасажирські та вантажні перевезення, на параметри розвитку транспортно-логістичного сектору в Україні.

Виклад основного матеріалу. Методологічна основа ґрунтується на відповідних наборах статистичних даних Держстату.

Прогнозування попиту на пасажирські та вантажні перевезення може бути реалізоване за допомогою математичної моделі, що використовує штучний інтелект. Одна з можливих моделей, яку можна використати, – модель прогнозування на основі методів машинного навчання, зокрема, регресії. Нижче наведено загальний опис такої моделі [22–26]:

1. Збір даних: зібрати історичні дані про попит на пасажирські та вантажні перевезення. Ці дані мають включати низку чинників, які можуть впливати на попит, наприклад, дати, час, дні тижня, свята, економічні показники та погоду. Важливо також враховувати український контекст, наприклад, географію, транспортну інфраструктуру та інші місцеві чинники.

2. Попередня обробка даних: перш ніж використовувати дані для навчання моделі, їх потрібно попередньо обробити. Це включає усунення прогалів, обробку даних, яких бракує, нормалізацію та стандартизацію.

3. Виділення ознак (функцій): вибрати важливі ознаки (функції), які будуть використовуватися для прогнозування попиту. Це можуть бути такі ознаки, як дата, час, день тижня, свята, економічні показники, погода тощо.

4. Розділення даних: розбити дані на тренувальний набір і тестовий набір. Тренувальний набір буде використовуватися для навчання моделі, а тестовий набір – для перевірки її точності.

5. Вибір моделі: вибрати підходящу модель машинного навчання, зокрема, регресійну модель, яка може передбачати числові значення.

6. Навчання моделі: навчити модель на тренувальному наборі даних.

Модель використовує історичні дані про попит та відповідні атрибути для встановлення взаємозв'язків між ними.

7. Оцінювання моделі: оцінити точність прогнозування моделі, використовуючи тестовий набір даних. Метрики, такі як середня квадратична помилка (Mean Squared Error) або середня абсолютна помилка (Mean Absolute Error), можуть бути використані для оцінювання результатів.

8. Прогнозування: застосувати навчену модель до нових даних для прогнозування попиту на пасажирські та вантажні перевезення. Використовуючи оновлені дані про ознаки, модель буде генерувати прогнози, що відображають очікуваний попит.

Важливо зазначити, що точність прогнозування може залежати від якості та обсягу наявних даних, вибраної моделі та правильного підбору ознак. Додатково можуть бути використані інші методи машинного навчання, такі як нейронні мережі або ансамблеві методи, для поліпшення точності прогнозів.

Загальний математичний опис алгоритмів прогнозування попиту на пасажирські та вантажні перевезення з використанням штучного інтелекту наведено нижче [27–29]:

1. Збір та попередня обробка даних:

1.1. Нехай маємо навчальну вибірку з n спостережень: $\{(X^i, Y^i)\}$, де $X^i = (X^i_1, X^i_2, \dots, X^i_m)$ – вхідні ознаки для спостереження i , Y^i – відповідне значення попиту.

1.2. Здійснюється попередня обробка даних, яка може включати стандартизацію (центрування та масштабування) вхідних ознак, а також можливу обробку пропущених даних.

2. Розділення даних:

2.1. Розділити дані на тренувальну вибірку та тестувальну вибірку.

2.2. Тренувальна вибірка: $\{(X_{train}^i, Y_{train}^i)\}$, де $i = 1, 2, \dots, n_{train}$.

Тестувальна вибірка: $\{(X_{test}^i, Y_{test}^i)\}$, де $i = 1, 2, \dots, n_{test}$.

3. Вибір та навчання моделі:

3.1. Вибрати модель, яка описує залежність між вхідними ознаками X та відповідним значенням попиту Y . Нехай ця модель задана як $\hat{Y} = f(X; \theta)$, де θ – параметри моделі.

3.2. Використовуючи тренувальну вибірку здійснюється процес навчання моделі, який полягає у знаходженні оптимальних значень параметрів θ .

3.3. Мінімізується функція втрат (loss function), яка відображає різницю між прогнозованими значеннями \hat{Y} та фактичними значеннями Y . Це може бути, наприклад, середня квадратична помилка (Mean Squared Error) або інша відповідна функція втрат.

4. Оцінювання моделі:

4.1. Після навчання моделі оцінюється її точність на тестувальній вибірці.

4.2. Використовуються метрики оцінки, такі як середня квадратична помилка (Mean Squared Error), середня абсолютна помилка (Mean Absolute Error) або інші відповідні метрики, щоб порівняти прогнозовані значення \hat{Y} з фактичними значеннями Y .

4.3. Оцінюється універсальність моделі, її здатність адаптуватися до нових наборів даних.

5. Налаштування та покращення моделі:

5.1. Виконується налаштування моделі за допомогою вибору оптимальних гіперпараметрів, які впливають на процес навчання та універсальність моделі.

5.2. Використовуються методи крос-валідації для оцінювання моделі з різними наборами гіперпараметрів та вибору найкращих значень.

5.3. Застосовуються методи регуляризації (L1-регуляризація (Lasso) або L2-регуляризація (Ridge)) для уникнення перенавчання та поліпшення загальної універсальності моделі.

6. Прогнозування попиту:

6.1. Навчені та скориговані моделі використовуються для оцінювання попиту на нові дані, які не були використані під час навчання.

6.2. Вхідні ознаки X для нових даних передаються в модель, так отримується прогнозоване значення попиту \hat{Y} .

Варіанти реалізації цих кроків можуть залежати від використаної мови програмування та бібліотек машинного навчання:

– Python з використанням бібліотеки scikit-learn: Використовуйте scikit-learn для попередньої обробки даних, розділення даних, вибору та навчання моделі лінійної регресії. Модель може бути налаштована, а також можуть бути застосовані інші моделі та методи машинного навчання [30];

– R з використанням бібліотеки caret: Використовуйте бібліотеку caret для навчання моделі лінійної регресії, включно з попередньою обробкою даних, розділенням даних, оцінюванням моделі та налаштуванням гіперпараметрів [31];

– TensorFlow або PyTorch для глибинного навчання: якщо у вас є багато даних та комплекс залежностей, можна розглянути використання нейронних мереж з використанням фреймворків TensorFlow або PyTorch. Ці фреймворки надають різноманітні можливості для побудови, навчання та налаштування нейронних мереж для прогнозування попиту [32];

– Microsoft Azure або Amazon AWS: якщо у вас є доступ до хмарних платформ, таких як Microsoft Azure або Amazon AWS, ви можете використовувати їхні інструменти для машинного навчання, такі як Azure Machine Learning або Amazon SageMaker. Ці платформи надають інтегровані середовища для розроблення, навчання та використання моделей машинного навчання [33].

Незалежно від вибраного варіанту важливо мати чіткий план кожного кроку, правильно обробляти дані, налаштовувати та оцінювати модель, а також використовувати валідацію і тестування для оцінювання точності та універсальності моделі.

На основі відповідних наборів статистичних даних (доступних у Національному статистичному управлінні) оцінюється можливий вплив запропонованої моделі прогнозування попиту (на основі алгоритмів глибокого машинного навчання штучного інтелекту) на ключові параметри транспортного сектору в Україні. Методологічна основа ґрунтується на доступних статистичних даних за декаду 2010–2020 рр. (рис. 1 та 2).

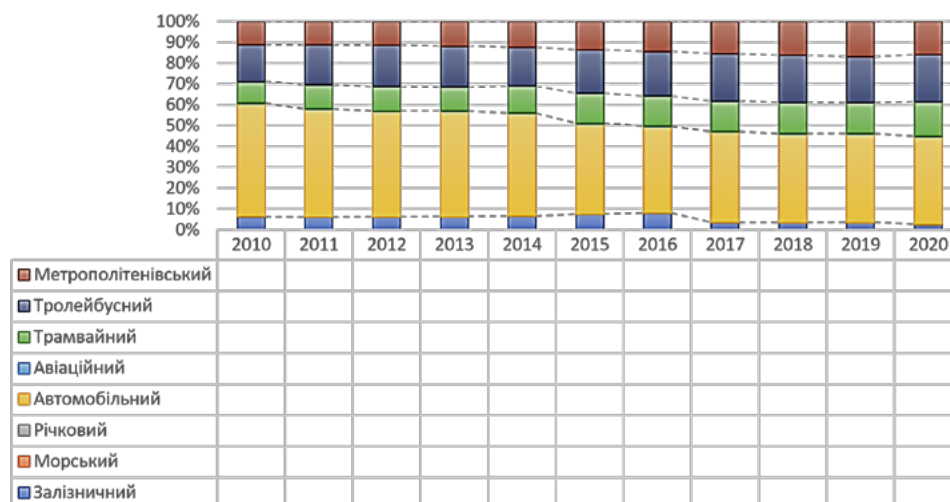


Рис. 1. Структура досліджуваного статистичного масиву даних функціонування транспортної галузі України за показником кількості перевезених пасажирів (в мільйонах пасажирів на рік)

Джерело: створено автором за даними Держстату

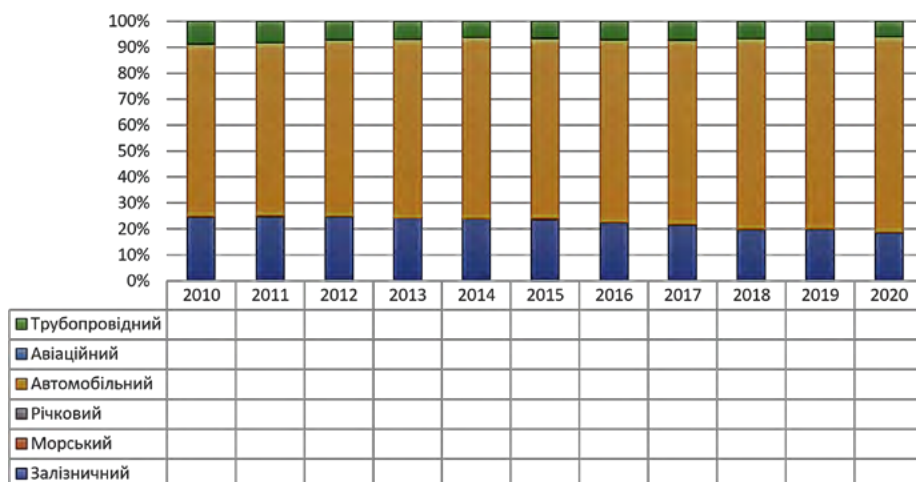


Рис. 2. Структура досліджуваного статистичного масиву даних функціонування транспортної галузі України за показником кількості перевезених вантажів (в мільйонах тон на рік)

Джерело: створено автором за даними Держстату

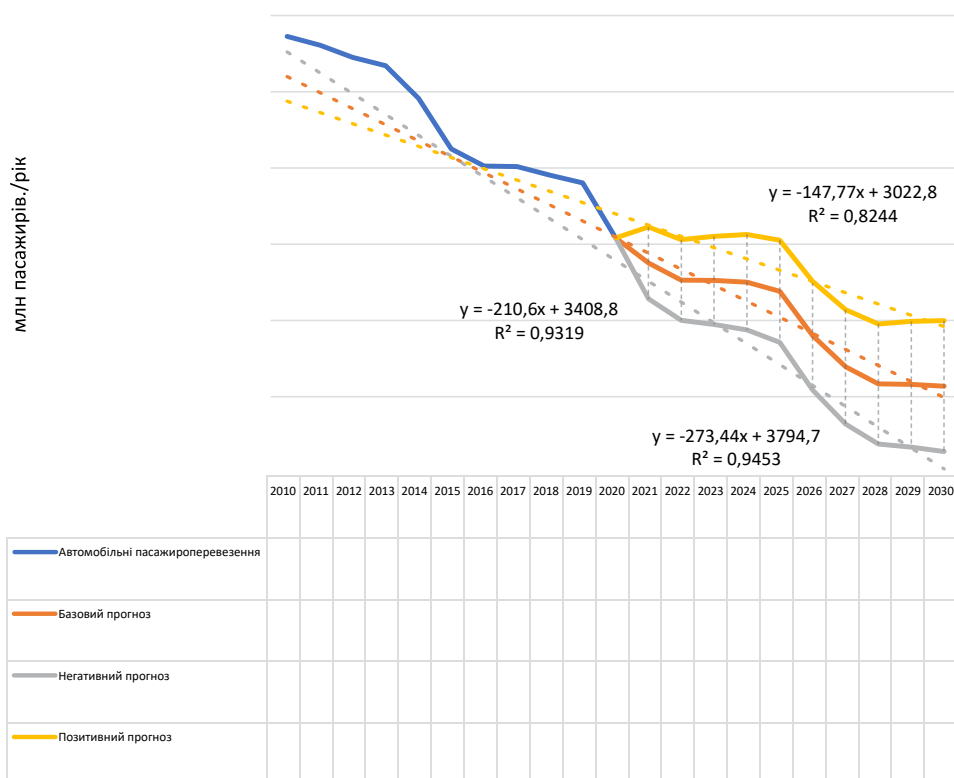


Рис. 3. Прогноз ймовірного впливу імплементації системного рішення з інтеграції штучного інтелекту для задоволення попиту в організації пасажироперевезень в автомобільному секторі транспортно-логістичної галузі України

Джерело: створено автором за даними Держстату

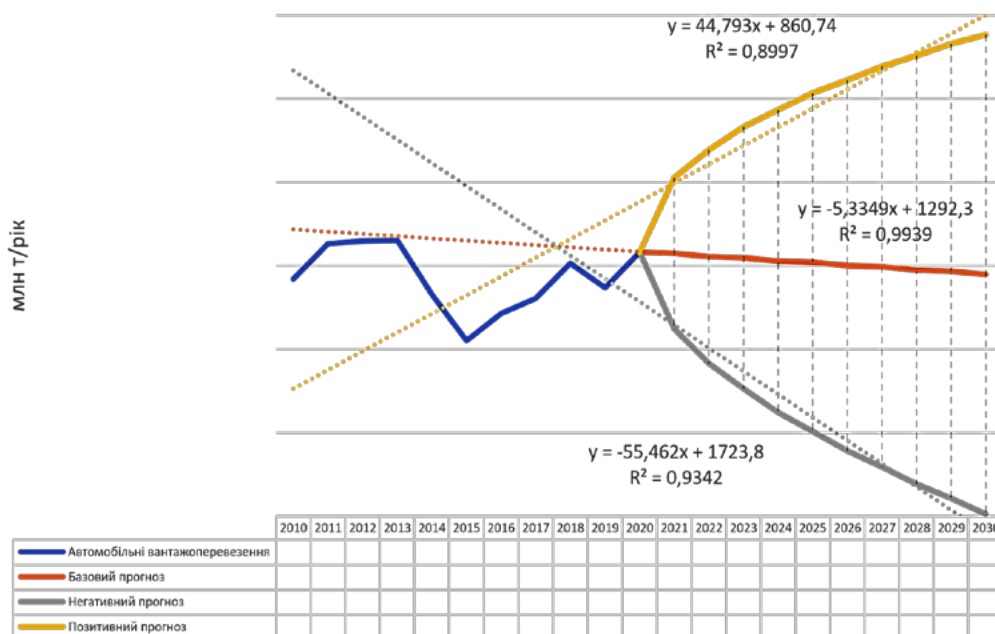


Рис. 4. Прогноз ймовірного впливу імплементації системного рішення з інтеграції штучного інтелекту для задоволення попиту в організації вантажоперевезень в автомобільному секторі транспортно-логістичної галузі України
Джерело: створено автором за даними Держстату

Як свідчить аналіз відповідних статистичних рядів Державної служби статистики (рис. 1 та 2), транспортний сектор в Україні протягом досліджуваного періоду перебував у стані рецесії. Цей чинник є обґрунтуванням для проведення дослідження в обраному векторі дослідження, включно з методологією оптимізації, вплив якої оцінюється в цьому дослідженні. Також встановлено, що провідним сектором української транспортно-логістичної галузі є автомобільний транспорт. Зважаючи на встановлений факт, доцільно оцінити вплив запропонованої моделі прогнозування попиту на пасажирські та транспортні перевезення у разі застосування у якості системного рішення з організації пасажиро- та вантажопотоків за допомогою штучного інтелекту (рис. 3 та 4).

Результати статистичного прогнозу ймовірного впливу інструментів штучного інтелекту у якості системного рішення для задоволення попиту пасажиро- та вантажоперевезень в автомобільному секторі транспортно-логістичної галузі України дають змогу зробити такі припущення:

Запропоноване системне рішення (на базі наданої моделі організаційно-технологічного прогнозу з імплементації штучного інтелекту) ймовірно матиме можливість сповільнити рецесію в досліджуваній сфері.

Прогнозування вантажоперевезень є більш точним (за відповідним коефіцієнтом достовірності апроксимації), порівняно з аналогічними даними для пасажироперевезень, що пояснюється багатofакторністю явища організації транспортування пасажирів і потребує більш складної математичної моделі.

Застосування організаційної схеми функціонування транспортнологістичної схеми на базі штучного інтелекту матиме прямі економічні наслідки:

Покращення планування ресурсів: модель прогнозування на основі штучного інтелекту дає змогу передбачати попит на пасажирські та вантажні перевезення з високою точністю. Це допомагає транспортним компаніям та органам управління з плануванням ресурсів, таких як транспортні засоби, робоча сила, паливо та інші матеріальні ресурси. Вони можуть підготуватися до змін попиту, оптимізувати маршрути та розподіл ресурсів, що призводить до зниження витрат і підвищення ефективності.

Оптимізація транспортної інфраструктури: застосування штучного інтелекту для прогнозування попиту може допомогти в розробленні стратегій розвитку та оптимізації транспортної інфраструктури. Модель може ідентифікувати потенційні зони зростання попиту та визначити необхідність розширення або модернізації наявних транспортних вузлів, магістралей та інших інфраструктурних об'єктів.

Покращення безпеки та зменшення ризиків: штучний інтелект може допомогти виявляти паттерни та прогнозувати ризики в транспортній галузі, такі як аварії, перевантаження, затори, несправності транспортних засобів тощо. Це дає змогу оперативно реагувати на потенційні проблеми, вживати заходів безпеки та зменшувати ризики для пасажирів, вантажу та персоналу.

Покращення якості обслуговування. Прогнозування попиту на пасажирські та вантажні перевезення допомагає підвищити якість обслуговування. Транспортні компанії можуть адаптувати свої послуги до очікувань клієнтів, забезпечити своєчасність та доступність перевезень, а також вдосконалити сервіс та комфорт у пасажирських транспортних засобах.

3.5. Екологічна сталість. Використання штучного інтелекту для прогнозування попиту може сприяти екологічній сталості в транспортній галузі. Оптимізація маршрутів та ресурсів допомагає знизити викиди шкідливих речовин, покращити енергоефективність транспортних засобів та використання палива, а також сприяє впровадженню екологічних технологій і ініціатив.

4. Загалом, розроблена модель прогнозування на базі штучного інтелекту має потенціал змінити транспортну галузь України, сприяючи покращенню планування, оптимізації ресурсів, підвищенню ефективності, зменшенню ризиків та покращенню якості обслуговування. Прогнозування попиту може стати важливим інструментом для прийняття рішень і підтримки стратегічного розвитку транспортної галузі.

Висновки. За результатами дослідження встановлена потенційна можливість до технологічно-економічної оптимізації сучасної транспортнологістичної галузі України через імплементацію системних організаційних рішень на базі штучного інтелекту, зокрема для прогнозування та задоволення попиту пасажиро- та вантажоперевезень. Запропонована модель та інструменти впровадження засобів штучного інтелекту, що базуються на технологіях глибокого машинного навчання. Виконане прогнозно-статистичне оцінювання ймовірного впливу системних рішень з інтеграції штучного інтелекту в досліджувану галузь економічної діяльності України, результати якої вказують на позитивні зрушення в транспортній сфері, зокрема на ймовірну можливість зупинити тривалий період рецесії. Результати

дослідження мають практичні наслідки в частині формування механізмів та відповідних організаційно-технологічних рішень з впровадженням в економіко-технологічних простір України новітніх технологій четвертої хвилі індустріального розвитку та глобальної цифровізації. Подальші дослідження спрямовані на удосконалення прогнозно-оптимізаційних моделей, зокрема для встановлення більш точної моделі прогнозування попиту на пасажирські перевезення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Gerardo Muros Anguita J., Díaz Olariaga O. Air cargo transport demand forecasting using ConvLSTM2D, an artificial neural network architecture approach. *Case studies on transport policy*. 2023. P. 101009. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2023.101009> (date of access: 08.07.2023).
2. Ficzer P. The role of artificial intelligence in the development of railway transportation. *Design of machines and structures*. 2023. Vol. 13, no. 1. P. 67–73. URL: <https://doi.org/10.32972/dms.2023.005> (date of access: 08.07.2023).
3. Bharadiya J. Artificial intelligence in transportation systems A critical review. *American journal of computing and engineering*. 2023. Vol. 6, no. 1. P. 34–45. URL: <https://doi.org/10.47672/ajce.1487> (date of access: 08.07.2023).
4. Golinska-Dawson P., Sethanan K. Sustainable urban freight for energyefficient smart cities–systematic literature review. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 6. P. 2617. URL: <https://doi.org/10.3390/en16062617> (date of access: 08.07.2023).
5. Applications of artificial intelligence in transport: an overview / R. Abduljabbar et al. *Sustainability*. 2019. Vol. 11, no. 1. P. 189. URL: <https://doi.org/10.3390/su11010189> (date of access: 08.07.2023).
6. Gui-E S., Jian-Guo S. Artificial intelligence-based optimal control method for energy saving in food supply chain logistics transportation. *2020 IEEE international conference on industrial application of artificial intelligence (IAAI)*, Harbin, China, 25–27 December 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/iaai51705.2020.9332849> (date of access: 08.07.2023).
7. Tselentis D. I., Papadimitriou E., van Gelder P. The usefulness of artificial intelligence for safety assessment of different transport modes. *Accident analysis & prevention*. 2023. Vol. 186. P. 107034. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2023.107034> (date of access: 08.07.2023).
8. Artificial intelligence techniques for driving safety and vehicle crash prediction / Z. Halim et al. *Artificial intelligence review*. 2016. Vol. 46, no. 3. P. 351–387. URL: <https://doi.org/10.1007/s10462-016-9467-9> (date of access: 08.07.2023).
9. IoT-Based Non-Intrusive Automated Driver Drowsiness Monitoring Framework for Logistics and Public Transport Applications to Enhance Road Safety. M. A. Khan et al. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11, P. 14385–14397. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3244008> (date of access: 08.07.2023).

10. Babayigit B., Gürbüz F., Denizhan B. Logistics performance index estimating with artificial intelligence. *International journal of shipping and transport logistics*. 2023. Vol. 16, no. 3/4. P. 360. URL: <https://doi.org/10.1504/ijstl.2023.129876> (date of access: 08.07.2023).
11. Fog robotics-based intelligence transportation system using line-of-sight intelligent transportation / E. Poornima et al. *Multimedia tools and applications*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s11042-023-15086-6> (date of access: 08.07.2023).
12. Vehicle artificial intelligence system based on intelligent image analysis and 5G network / B. Liu et al. *International journal of wireless information networks*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1007/s10776-021-00535-6> (date of access: 08.07.2023).
13. Mulongo N. Y., Mnkandla E., Kanakana-Katumba G. Artificial intelligence as key driver for competitiveness in the railway industry: review. *2021 62nd international scientific conference on information technology and management science of riga technical university (ITMS)*, Riga, Latvia, 14–15 October 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/itms52826.2021.9615314> (date of access: 08.07.2023).
14. Harnessing artificial intelligence for business competitiveness in achieving sustainable development goals / A. Senadjki et al. *Journal of Asia-Pacific Business*. 2023. P. 1–21. URL: <https://doi.org/10.1080/10599231.2023.2220603> (date of access: 08.07.2023).
15. Ulnicane I. Emerging technology for economic competitiveness or societal challenges? Framing purpose in Artificial Intelligence policy. *Global public policy and governance*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/s43508-022-000498> (date of access: 08.07.2023).
16. Kolodiichuk V., Cherevko H., Popivniak R. Quality assessment of transit potential of the transport–logistics system of ukraine. *Global business review*. 2020. P. 097215092090700. URL: <https://doi.org/10.1177/0972150920907008> (date of access: 08.07.2023).
17. Dyczkowska J. A., Reshetnikova O. Logistics centers in ukraine: analysis of the logistics center in lviv. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 21. P. 7975. URL: <https://doi.org/10.3390/en15217975> (date of access: 08.07.2023).
18. Liashenko V., Ivanov S., Trushkina N. A conceptual approach to forming a transport and logistics cluster as a component of the region’s innovative infrastructure (on the example of prydniprovsky economic region of ukraine). *Virtual economics*. 2021. Vol. 4, no. 1. P. 19–53. URL: [https://doi.org/10.34021/ve.2021.04.01\(2\)](https://doi.org/10.34021/ve.2021.04.01(2)) (date of access: 08.07.2023).
19. Boukerche A., Tao Y., Sun P. Artificial intelligence-based vehicular traffic flow prediction methods for supporting intelligent transportation systems. *Computer networks*. 2020. Vol. 182. P. 107484. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107484> (date of access: 08.07.2023).
20. Future urban transport management / Z. Gao et al. *Frontiers of engineering management*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s42524-023-02553> (date of access: 08.07.2023).

21. A Physics-informed road user safety field theory for traffic safety assessments applying artificial intelligence-based video analytics / A. Arun et al. *Analytic Methods in Accident Research*. 2023. P. 100252. URL: <https://doi.org/10.1016/j.amar.2022.100252> (date of access: 08.07.2023).
22. Zachariah R. A., Sharma S., Kumar V. Systematic review of passenger demand forecasting in aviation industry. *Multimedia tools and applications*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s11042-023-15552-1> (date of access: 08.07.2023).
23. A data analytics framework for reliable bus arrival time prediction using artificial neural networks / E. Hassannayebi et al. *International journal of data science and analytics*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s41060-023-00391y> (date of access: 08.07.2023).
24. Railway freight demand forecasting based on multiple factors: grey relational analysis and deep autoencoder neural networks / C. Liu et al. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, no. 12. P. 9652. URL: <https://doi.org/10.3390/su15129652> (date of access: 08.07.2023).
25. Machine learning applied to public transportation by bus: a systematic literature review / T. Alexandre et al. *Transportation research record: journal of the transportation research board*. 2023. P. 036119812311551. URL: <https://doi.org/10.1177/03611981231155189> (date of access: 08.07.2023).
26. Machine learning for air transport planning and management / G. Wild et al. *AIAA AVIATION 2022 forum*, Chicago, IL & Virtual. Reston, Virginia, 2022. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2022-3706> (date of access: 08.07.2023).
27. Workforce optimisation for improving customer experience in urban transportation using heuristic mathematical model / J. Chen et al. *International journal of shipping and transport logistics*. 2021. Vol. 13, no. 5. P. 538. URL: <https://doi.org/10.1504/ijstl.2021.117278> (date of access: 08.07.2023).
28. Forecasting the international air passengers of Iran using an artificial neural network / F. Nourzadeh et al. *International journal of industrial and systems engineering*. 2020. Vol. 34, no. 4. P. 562. URL: <https://doi.org/10.1504/ijise.2020.106089> (date of access: 08.07.2023).
29. Traffic flow modelling of long and short trucks using a hybrid artificial neural network optimized by particle swarm optimization / I. Oyeyemi Olayode et al. *International journal of transportation science and technology*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2023.04.004> (date of access: 08.07.2023).
30. Hu Y.-C. Air passenger flow forecasting using nonadditive forecast combination with grey prediction. *Journal of air transport management*. 2023. Vol. 112. P. 102439. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2023.102439> (date of access: 08.07.2023).
31. Saiyad G., Srivastava M., Rathva D. Exploring determinants of feeder mode choice behavior using Artificial Neural Network: Evidences from Delhi metro. *Physica A: statistical mechanics and its applications*. 2022. P. 127363. URL: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.127363> (date of access: 08.07.2023).

32. Heghedus C., Chakravorty A., Rong C. Neural network frameworks. comparison on public transportation prediction. *2019 IEEE international parallel and distributed processing symposium workshops (IPDPSW)*, Rio de Janeiro, Brazil, 20–24 May 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/ipdpsw.2019.00138> (date of access: 08.07.2023).
33. Nigam R., Govinda K. Cloud based flight delay prediction using logistic regression. *2017 international conference on intelligent sustainable systems (ICISS)*, Palladam, 7–8 December 2017. 2017. URL: <https://doi.org/10.1109/iss1.2017.8389254> (date of access: 08.07.2023).

REFERENCES

1. Anguita, J. G. M., & Olariaga, O. D. (2023). Air cargo transport demand forecasting using ConvLSTM2D, an artificial neural network architecture approach. *Case Studies on Transport Policy*, 12, 101009. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2023.101009>.
2. Ficzero, P. (2023). The role of artificial intelligence in the development of railway transportation. *Design of machines and structures*, 13(1), 67-73. <https://doi.org/10.32972/dms.2023.005>.
3. Bharadiya, J. (2023). Artificial Intelligence in Transportation Systems A Critical Review. *American Journal of Computing and Engineering*, 6(1), 34-45. <https://doi.org/10.47672/ajce.1487>.
4. Golinska-Dawson, P., & Sethanan, K. (2023). Sustainable urban freight for energy-efficient smart cities– systematic literature review. *Energies*, 16(6), 2617. <https://doi.org/10.3390/en16062617>.
5. Abduljabbar, R., Dia, H., Liyanage, S., & Bagloee, S.A. (2019). Applications of artificial intelligence in transport: An overview. *Sustainability*, 11(1), 189. <https://doi.org/10.3390/su11010189>.
6. Gui-e, S., & Jian-Guo, S. (2020, December). Artificial Intelligence-Based Optimal Control Method for Energy Saving in Food Supply Chain Logistics Transportation. In *2020 IEEE International Conference on Industrial Application of Artificial Intelligence (IAAI)* (pp. 33-38). IEEE. <https://doi.org/10.1109/iaai51705.2020.9332849>.
7. Tselentis, D. I., Papadimitriou, E., & van Gelder, P. (2023). The usefulness of artificial intelligence for safety assessment of different transport modes. *Accident Analysis & Prevention*, 186, 107034. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2023.107034>.
8. Halim, Z., Kalsoom, R., Bashir, S., & Abbas, G. (2016). Artificial intelligence techniques for driving safety and vehicle crash prediction. *Artificial Intelligence Review*, 46, 351-387. <https://doi.org/10.1007/s10462-016-9467-9>.
9. Khan, M. A., Nawaz, T., Khan, U. S., Hamza, A., & Rashid, N. (2023). IoT-Based Non-Intrusive Automated Driver Drowsiness Monitoring Framework for Logistics and Public Transport Applications to Enhance Road Safety. *IEEE Access*, 11, 14385-14397. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3244008>.
10. Babayigit, B., Gürbüz, F., & Denizhan, B. (2023). Logistics performance index estimating with artificial intelligence. *International Journal*

- of Shipping and Transport Logistics*, 16(3-4), 360-371. <https://doi.org/10.1504/IJSTL.2023.129876>.
11. Poornima, E., Muthu, B., Agrawal, R., Kumar, S. P., Dhingra, M., Asaad, R. R., & Jumani, A. K. (2023). Fog robotics-based intelligence transportation system using line-of-sight intelligent transportation. *Multimedia Tools and Applications*, 1-29. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-15086-6>.
 12. Liu, B., Han, C., Liu, X., & Li, W. (2023). Vehicle artificial intelligence system based on intelligent image analysis and 5G network. *International Journal of Wireless Information Networks*, 30(1), 86-102. <https://doi.org/10.1007/s10776021-00535-6>.
 13. Mulongo, N. Y., Mnkandla, E., & Kanakana-Katumba, G. (2021, October). Artificial Intelligence as Key Driver for Competitiveness in the Railway Industry. In *2021 62nd International Scientific Conference on Information Technology and Management Science of Riga Technical University (ITMS)* (pp. 16). IEEE. <https://doi.org/10.1109/itms52826.2021.9615314>.
 14. Senadjki, A., Ogbeibu, S., Mohd, S., Hui Nee, A. Y., & Awal, I. M. (2023). Harnessing Artificial Intelligence for Business Competitiveness in Achieving Sustainable Development Goals. *Journal of Asia-Pacific Business*, 1-21. <https://doi.org/10.1080/10599231.2023.2220603>.
 15. Ulnicane, I. (2022). Emerging technology for economic competitiveness or societal challenges? Framing purpose in Artificial Intelligence policy. *Global Public Policy and Governance*, 2(3), 326-345. <https://doi.org/10.1007/s43508-02200049-8>.
 16. Kolodiichuk, V., Cherevko, H., & Popivniak, R. (2020). Quality Assessment of Transit Potential of the Transport–Logistics System of Ukraine. *Global Business Review*, 24(1), 171-184. <https://doi.org/10.1177/0972150920907008>.
 17. Dyczkowska, J. A., & Reshetnikova, O. (2022). Logistics Centers in Ukraine: Analysis of the Logistics Center in Lviv. *Energies*, 15(21), 7975. <https://doi.org/10.3390/en15217975>.
 18. Liashenko, V., Ivanov, S., & Trushkina, N. (2021). A Conceptual Approach to Forming a Transport and Logistics Cluster as a Component of the Region's Innovative Infrastructure (on the Example of Prydniprovsky Economic Region of Ukraine). *Virtual Economics*, 4(1), 19-53. [https://doi.org/10.34021/ve.2021.04.01\(2\)](https://doi.org/10.34021/ve.2021.04.01(2)).
 19. Boukerche, A., Tao, Y., & Sun, P. (2020). Artificial intelligence-based vehicular traffic flow prediction methods for supporting intelligent transportation systems. *Computer networks*, 182, 107484. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107484>.
 20. Gao, Z., Huang, H. J., Guo, J., Yang, L., & Wu, J. (2023). Future urban transport management. *Frontiers of Engineering Management*, 1-6. <https://doi.org/10.1007/s42524-023-0255-3>.
 21. Arun, A., Haque, M. M., Washington, S., & Mannering, F. (2023). A physics-informed road user safety field theory for traffic safety assessments applying artificial intelligence-based video analytics. *Analytic methods in accident research*, 37, 100252. <https://doi.org/10.1016/j.amar.2022.100252>.

22. Zachariah, R. A., Sharma, S., & Kumar, V. (2023). Systematic review of passenger demand forecasting in aviation industry. *Multimedia Tools and Applications*, 1-37. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-15552-1>.
23. Hassannayebi, E., Farjad, A., Azadnia, A., Javidi, M., & Chunduri, R. (2023). A data analytics framework for reliable bus arrival time prediction using artificial neural networks. *International Journal of Data Science and Analytics*, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s41060-023-00391-y>.
24. Liu, C., Zhang, J., Luo, X., Yang, Y., & Hu, C. (2023). Railway Freight Demand Forecasting Based on Multiple Factors: Grey Relational Analysis and Deep Autoencoder Neural Networks. *Sustainability*, 15(12), 9652. <https://doi.org/10.3390/su15129652>.
25. Alexandre, T., Bernardini, F., Viterbo, J., & Pantoja, C. E. (2023). Machine Learning Applied to Public Transportation by Bus: A Systematic Literature Review. *Transportation Research Record*, 03611981231155189. <https://doi.org/10.1177/03611981231155189>.
26. Wild, G., Baxter, G., Srisaeng, P., & Richardson, S. (2022). Machine learning for air transport planning and management. In *AIAA AVIATION 2022 Forum* (p. 3706). <https://doi.org/10.2514/6.2022-3706>.
27. Chen, J., Shi, W., Wang, X., Pandian, S., & Sathishkumar, V. E. (2021). Workforce optimisation for improving customer experience in urban transportation using heuristic mathematical model. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 13(5), 538-553. <https://doi.org/10.1504/IJSTL.2021.117278>.
28. Nourzadeh, F., Ebrahimnejad, S., Khalili-Damghani, K., & Hafezalkotob, A. (2020). Forecasting the international air passengers of Iran using an artificial neural network. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 34(4), 562-581. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2020.106089>.
29. Olayode, I. O., Du, B., Tartibu, L. K., & Alex, F. J. (2023). Traffic flow modelling of long and short trucks using a hybrid artificial neural network optimized by particle swarm optimization. *International Journal of Transportation Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2023.04.004>.
30. Hu, Y. C. (2023). Air passenger flow forecasting using nonadditive forecast combination with grey prediction. *Journal of Air Transport Management*, 112, 102439. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2023.102439>.
31. Saiyad, G., Srivastava, M., & Rathwa, D. (2022). Exploring determinants of feeder mode choice behavior using Artificial Neural Network: Evidences from Delhi metro. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 598, 127363. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.127363>.
32. Heghedus, C., Chakravorty, A., & Rong, C. (2019, May). Neural network frameworks. comparison on public transportation prediction. In *2019 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW)* (pp. 842-849). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ipdpsw.2019.00138>.
33. Nigam, R., & Govinda, K. (2017, December). Cloud based flight delay prediction using logistic regression. In *2017 International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS)* (pp. 662-667). IEEE. <https://doi.org/10.1109/iss1.2017.8389254>.

EVALUATION OF CARGO SHIPS CONSTRUCTION PRICES AND THEIR IMPACT ON INSURANCE COSTS

V.V. Zhykharieva¹, O.V. Koretska², Yu.V. Delik³

¹Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Economics and Finance,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-2179-8483

²PhD in Economics, Associate Professor at the Department of Economics and Finance,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-4991-835X

³Postgraduate Student at the Department of Economics and Finance,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-8130-8474

Summary

Introduction. The relevance of the research is determined by high capital expenditures for ships construction, complexity of ships as objects of assessment, the need to take into account factors affecting the prices of ships construction, use of adequate assessment methods, and the relationship between ship prices and the costs of insurance. **Purpose.** The article is devoted to development of methodological and methodical bases for evaluating the construction prices of cargo ships, in particular: systematization of factors affecting construction prices, classification of methodical approaches to determining ship prices, improvement of assessment methods from the point of view of shipowners, and taking into account the influence of ship price on the costs of insurance. **Results.** The factors affecting shipbuilding prices are systematized. The classification of approaches to determining ships construction prices has been developed. The method for calculating the discounted value of free cash flows to equity is proposed. The method of correlation-regression analysis for estimating the construction prices of ships of a certain type depending on deadweight is proposed. The stages of estimating the ship's construction price on the example of the market method have been determined. It is shown that the price of a ship directly affects the insurance premium and other terms of the insurance contract. **Conclusions.** The shipbuilding costs are affected by the prices of steel, equipment and materials, the cost of labor, demand from shipowners and supply of shipbuilding capacity, currency fluctuations, regulatory requirements, government regulation, etc. The classification of approaches to the estimation of ships construction prices includes cost approach, intrinsic value and market approaches. The proposed method of discounted free cash flow to equity is universal, and can be used for various chartering schemes. The market approach includes the methods of correlation regression analysis, the method of parametric series, the method of specific indicators, and the engineering method. There is a close positive correlation between deadweight and construction prices of cargo ships. Nonlinear regression models sufficiently describe the dependence of the construction price of a certain type of ship on deadweight. The ship price directly affects the insurance premium and other terms of ship's insurance.

Key words: cargo vessels, assets valuation, pricing, shipbuilding, price of ship construction, insurance, maritime transport.

ОЦІНКА ЦІН БУДІВНИЦТВА ВАНТАЖНИХ СУДЕН ТА ЇХ ВПЛИВ
НА ВИТРАТИ НА СТРАХУВАННЯ

В.В. Жихарєва¹, О.В. Корецька², Ю.В. Делік³

¹д.е.н., професор, завідувачка кафедри «Економіка і фінанси»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-2179-8483

²к.е.н., доцент кафедри «Економіка і фінанси»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-4991-835X

³аспірантка кафедри «Економіка і фінанси»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-8130-8474

Анотація

Вступ. Актуальність теми дослідження зумовлена високими капітальними витратами судновласників на будівництво флоту, складністю морських суден як об'єктів оцінки, необхідністю врахування факторів, що впливають на формування будівельної ціни, використання адекватних методів оцінки, а також зв'язком між цінами суден та витратами на їх страхування. **Мета.** Стаття присвячена розвитку методологічних та методичних засад оцінки будівельних цін морських суден, зокрема: систематизації факторів, що впливають на будівельні ціни, класифікації методичних підходів до визначення цін вантажних суден, удосконаленню методів оцінки з погляду судновласника, урахуванню впливу будівельної ціни судна на витрати на страхування. **Результати.** Систематизовано фактори, що впливають на ціни будівництва суден. Розроблено класифікацію підходів до визначення ціни будівництва судна. Запропоновано методику розрахунку приведеної вартості вільних грошових потоків на власний капітал, пов'язаних із судном. Запропоновано методику кореляційно-регресійного аналізу для оцінки цін суден певного типу залежно від дедвейту.

Визначено етапи оцінки будівельної ціни судна на прикладі ринкового підходу. Показано, що ціна впливає на страхову премію та інші умови страхового контракту. **Висновки.** На ціни будівництва суден впливають ціни сталі, обладнання та матеріалів, вартість трудових ресурсів, попит з боку судновласників і пропозиція суднобудівельних потужностей, коливання курсів валют, регулятивні вимоги, заходи державного регулювання тощо. Класифікація підходів до оцінки цін на будівництво морських суден включає витратний, дохідний та ринковий підходи. Запропонований метод дисконтованих вільних грошових потоків на власний капітал є універсальним і може використовуватися для різних схем фрахтування. Ринковий підхід включає кореляційно-регресійний аналіз, метод параметричних рядів, метод питомих показників та інженерний метод. Між дедвейтом і будівельними цінами вантажних суден існує тісна позитивна кореляція, а моделі нелінійної регресії якісно описують залежність будівельної ціни судна певного типу від дедвейту. Ціна судна напряму впливає на страхову премію та інші умови страхування судна.

Ключові слова: вантажні судна, оцінка активів, ціноутворення, суднобудування, ціна будівництва судна, страхування, морський транспорт.

Introduction. Sea vessels are unique and expensive engineering objects that consist of hundreds of different mechanisms and elements. The process of estimating the cost of building a ship is a complex task that requires taking into account various factors that influence its formation and applying reasonable estimation methods. The cost of building ships is constantly increasing, which increases capital expenditures of shipping companies. Insurance costs are a significant part of direct operating expenditures of shipowners. All this makes it relevant to study the process of formation of prices for the construction of cargo vessels and their impact on insurance costs.

Formulation of the problem. The further development of the methodological and methodical bases for estimating prices for the construction of cargo ships requires taking into account the factors that influence the formation of prices for the construction of sea ships, the systematization and improvement of methodical approaches to determining construction prices, which have a significant impact on the financial results of operations and the level of risk of shipping and insurance companies.

Analysis of recent research and publications. The issues of analysis and evaluation of the cost of building sea vessels were studied mainly by foreign scientists. In the study of José & Gordo (2017), the analysis of the cost structure in shipbuilding was performed [1]. The methodology that allows the shipyard to determine the costs of building the ship's hull and directions for increasing productivity was proposed. In the article by Azhar and Kristiyono (2022), a study of the cost structure for the construction of ferries of various sizes and their components was carried out [2]. The use of linear regression models was proposed for the analysis of statistical data on the cost of construction of ferries and their components.

The analogy approach, parametric approach and engineering approach to the determination of ship prices are widely used in world practice (CostFact, 2022) [3]. In the study of Shuker (2018), it is shown that shipbuilding prices are based on costs that depend on the prices of material and labor resources, as well as supply and demand in the shipping market [4]. In the article of Dai, Hu, Chen, and Zheng (2015) the relationship between construction price fluctuations and the volatility of freight rates on the dry cargo transportation market using methods of descriptive statistics is investigated [5]. It was shown that freight rates have a significant influence on the construction prices of bulk carriers. In the paper by Zhykharieva, Shyriaieva, and Vlasenko (2019), the measures of state regulation of the shipbuilding industry, which affect construction prices and financial results of shipyards and shipping companies, are studied [6]. They include subsidizing shipbuilding, preferential lending, and the creation of reserve funds.

In the study of Knapp and Heij (2017), an empirical assessment of risk in sea shipping, which is based on a monetary value, is given [7]. It includes data on the quality of ship safety and insurance premiums related to potential losses. The relationship between a high level of risk and insurance premiums is illustrated.

The market price of a vessel is closely related to the CASCO insurance value, which can affect the coverage, as well as the provision of the Protection and Indemnity Insurance (P&I) (Gard News, 2005, February 1) [8].

Shipbuilding enterprises determine contract prices for the construction of sea vessels on the basis of the cost approach. However, the methodical approaches for estimating the construction value of sea vessels based on the intrinsic value approach and market approach, which are the most acceptable from the point of view of shipping

and insurance companies, are poorly developed. In addition to a shipyard and a shipping company, a creditor bank may participate in the transaction, which will judge its collateral value within the framework of mortgage lending, based on the economic attractiveness of the ship's construction, as well as an insurance company. Adequate assessment will allow establishing a fair relationship between the value of a vessel being mortgaged, the loan size and the amount of the insurance premium.

Formulation of the goals of the article. The goals of the paper are the systematization of factors that influence the formation of prices for the construction of cargo vessels, the classification of methodical approaches to determining the construction price of vessels, the improvement of methodical bases of price assessment from the point of view of a shipowner based on intrinsic value approach and market (analogy) approach, and taking into account the influence of the construction price on insurance costs.

Presentation of the main research material. Figure 1 shows the dynamics of the Producer Price Index by Industry: Shipbuilding and Repairing (U.S. Bureau of Labor Statistics, 2023) [9], which indicates increase in shipbuilding prices in the USA for the period from 1985 to 2023 by almost 2.5 times.

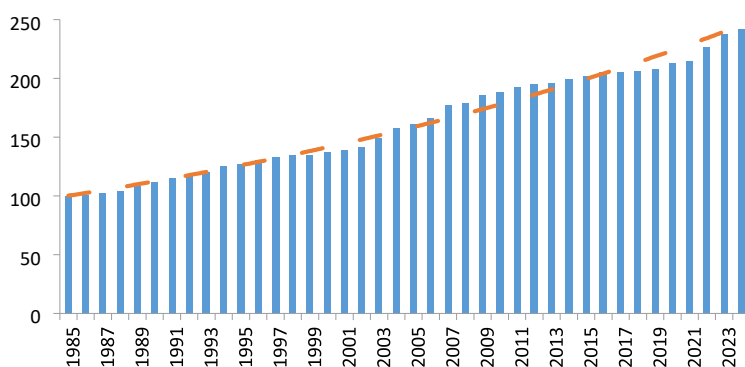


Fig. 1. Dynamics of Producer Price Index by Industry: Ship Building and Repairing (Index Dec 1985=100)

Table 1, based on data by Shuker (2018) [4], defines the typical structure of costs for the construction of Ultramax bulk carriers in China. As can be seen from this data, most of the costs for the construction of bulk carriers fall on the purchase of equipment and materials – 42%, steel for the ship's hull – 32%, and the labor cost – 16%. Other costs include project work, the cost of a guarantee for advance payments, and insurance for the construction period.

Table 1

Shipyard cost structure for building Ultramax bulk carriers in China

Expenditures	%
Equipment and materials	42
Steel	32
Labor cost	16
Other expenditures	10
Total	100

Consequently, shipbuilding costs depend on price fluctuations for various types of steel, materials and equipment, the country of construction, and labor standards. In addition, shipbuilding prices are affected by fluctuations in currency rates, regulatory requirements and measures related to state credit and financial regulation, which include subsidizing shipowners and shipbuilding enterprises, preferential lending, creation of reserve funds, etc. The price of a ship is affected by the relationship between supply and demand in shipbuilding. Fluctuations in demand are largely related to the length of the production cycle. Since the delivery of the ship is usually not carried out earlier than a year after the conclusion of the contract, shipowners order ships based not on the current situation, but on the forecast of its development. The increase in orders for the construction of ships, as a rule, exceeds the actual needs, as a result of which the volume of tonnage on the market increases and leads to the creation of a surplus fleet.

In figure 2 shows the main factors affecting fluctuations and changes in shipbuilding prices.

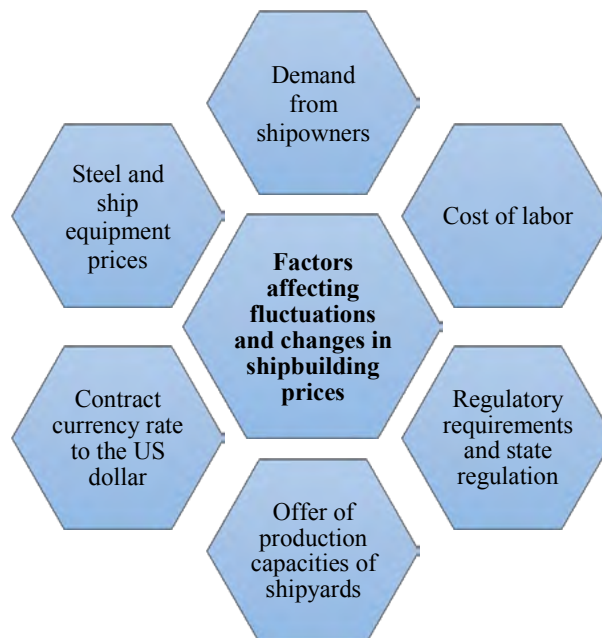


Fig. 2. The main factors affecting the prices for cargo vessels construction

The demand from shipowners is influenced by such factors as global demand for sea transportation, freight rates and forecasts of the freight market condition, market sentiment and expectations, fleet renewal, measures of credit and financial regulation of shipping companies, ship scrapping prices, the ratio of prices of new ships and second-hand ships (fig. 3).

To estimate the value of ships, as well as other assets, the cost approach, the intrinsic value approach and the market (analogy) approach are used. The cost approach involves taking into account the total costs of the shipyard for ship construction and the profit that the shipbuilding company expects to receive (José & Gordo, 2017) [1]. This method requires the calculation of the cost of all materials and components necessary for the construction of a ship, the availability of data on the labor intensity of all works,

wages, overheads and other costs, but it has a number of disadvantages and is rarely used to estimate ship prices by shipping companies.

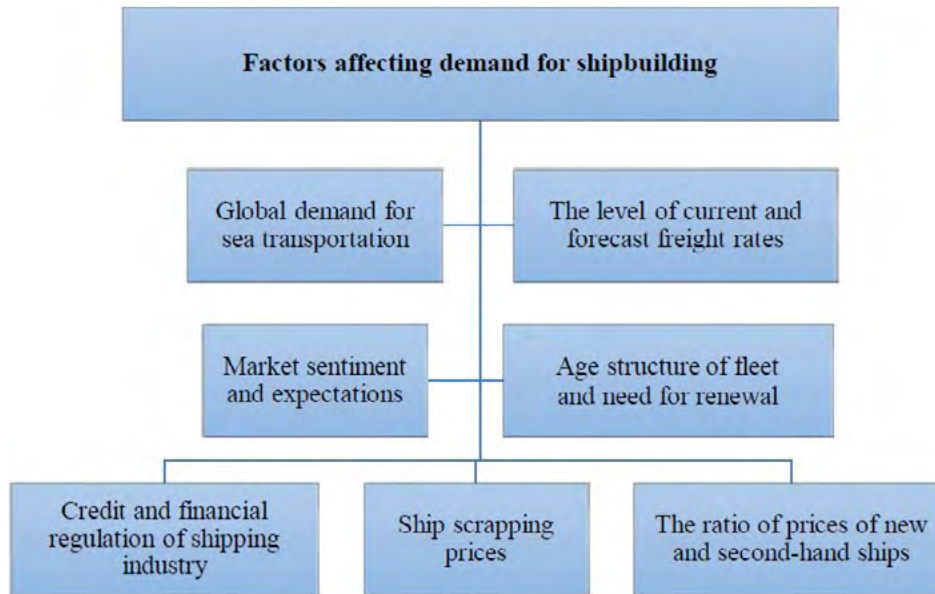


Fig. 3. Factors affecting the demand of shipowners for building ships

The intrinsic value approach (the discounted cash flow approach) is a set of methods for estimating the value of a vessel, based on the determination of the expected total discounted cash flows associated with the operation of the built vessel and its liquidation. The following method is proposed for calculating the discounted value of cash flows related to the vessel, based on the free cash flows to equity:

$$SV = \sum_{t=1}^T \frac{FCFE_t}{(1+r)^t} + \frac{S_T}{(1+r)^T}, \quad (1)$$

where

SV – intrinsic value of ship, defined as present value of free cash flows to equity;

FCFE_t – free cash flows to equity in year t; r – discount rate; t – number of year;

S_T – the projected cash flow from sale of vessel on the secondary market or scrapping in year T;

T – period of implementation of the investment project, years.

Free cash flow to equity in year t (FCFE_t) is used to determine the amount of free cash flow that will remain in the company after paying off all of its liabilities. FCFE are determined on the base of 3 financial statements model, taking into account type of vessel chartering which affecting on revenue calculation. For our case, it is suggested to use the indirect method of calculating cash flows from operating activities, and debt financing for ships construction:

$$\begin{aligned} FCFE_t &= NI_t + D_t + CWC_t - \text{Cash CAPEX}_t - F_t = \\ &= CFO_t - \text{Cash CAPEX}_t - F_t, \end{aligned} \quad (2)$$

where

NI_t – net income in year t ;

D_t – depreciation of ship value taking into account the expenditures for dock repairs in year t ;

CWC_t – changes in working capital in year t , defined on the base of changes in inventories, receivables and payables;

Cash $CAPEX_t$ – cash capital expenditures related to acquisition of a vessel and dock repairs in year t ;

CFO_t – cash flow from operating activity in year t ;

F_t – principal debt repayment in year t .

The procedure for calculating the revenue for defining the net income depends on a type of chartering and can be determined on the basis of voyage, time or bareboat charter schemes. The intrinsic value approach takes into account the forecast of changes in external operating conditions, macroeconomic indicators and characteristics of the vessel. The problems associated with forecasting future cash flows limit the applicability of this approach. The level of income fluctuates significantly due to the cyclical nature of the freight market, and the level of operating costs strongly depends on specific operating conditions, changes in prices for bunker fuel and other resources. The need to take into account the time value of money introduces additional uncertainty into calculations.

The market approach (the analogy approach or the relative value approach) is a set of methods for estimating ship value based on comparing its parameters with the parameters and prices of prototype ships for which there is sufficiently complete statistical information (CostFact, 2022) [3]. Comparison according to the commercial conditions of the agreements involves the introduction of technical, economic and commercial corrections in the prices of selected analogues, i.e. bringing them to the conditions of a specific order. The most important and common commercial corrections include corrections for bidding, delivery time, serialization and payment terms. To simplify the calculation of prices, the subgroups of structural elements listed above can be combined into more consolidated positions, for example: hull, engine room, room equipment, industrial equipment, etc.

If the price of a vessel or its structural element is calculated taking into account the change in the parameters of the object under study, such method is called parametric. The parametric methods include correlation-regression analysis, the method of specific indicators, and the aggregate (engineering) method.

The method of correlation-regression analysis establishes an empirical formula for the dependence of the price on the technical parameters or operational characteristics of a vessel, its structural elements or components of construction costs (Shuker, 2018) [4]. A variant of this method is the method of parametric series of vessels of the same type or their structural elements. The method of specific indicators assumes that the price is calculated based on consolidated indicators, depending on the cost of a unit of useful effect (for example, the weight of a structural element of a ship). The engineering method consists in determining the price of a vessel or its structural element based on the unit market prices of its constituent parts, followed by the summation of all the received prices (CostFact, 2022) [3].

Figure 4 presents the classification of methods of valuation the prices for construction of cargo vessels.

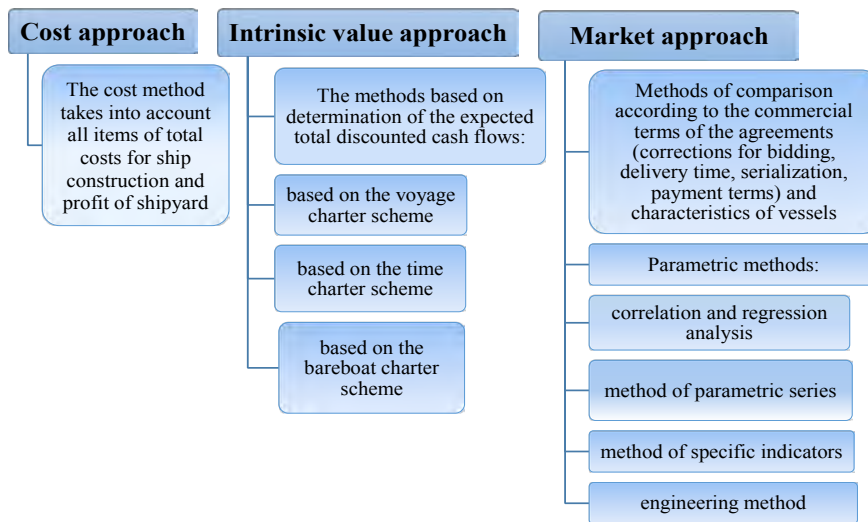


Fig. 4. Classification of methods of vessels construction prices valuation

Table 2 shows data on orders for bulk vessels in 2021–2023 (International Shipping News, 2022 [10], International Shipping News, 2023 [11], Simpson Spence Young, 2023, July 20 [12], Made-in-China, 2023, July 21) [13]). Table 3 shows descriptive statistics characterizing the sample.

Table 2

Data on orders for bulk carriers in 2021–2023

Order date	Quantity and class	Deadweight	Customer	Shipbuilder	Years of delivery	Ship price, USD mln
21.09.2021	6 dry cargo vessels	5400	Atobate	Chowgule	2023–2024	13,6
14.10.2021	8 Ultramax bulkers	63600	COSCO Shipping	Bank of Communications Financial Leasing	2023	32
16.04.2021	10 Panamax bulkers	82000	Nisshin Shipping	Jiangsu Hantong Ship Heavy Industry	2022–2023	28
14.06.2021	12 Capesize bulkers	209800	Himalaya Shipping	New Times Shipbuilding	2023–2024	67
21.09.2022	Capesize Newcastlemax Bulkers	210000	Bocimar	Qingdao Beihai Shipbuilding	2024	66
18.03.2022	4 Handy Bulklers	40000	Vogemann	Jiangsu Daijin Heavy Ind	2024	29
02.11.2022	2 Post Panamax Bulklers	95000	NYK Line	Oshima	2025	65
17.11.2022	10 Capesize Newcastlemax Bulklers	210000	Bocimar	Qingdao Beihai Shipbuilding	2025–2026	64
21.07.2023	Bulk Carrier	3000	Open offer	Taizhou Quihai Shippinf Science and Technology	2023	6,818

Table 2 (continuance)

01.02.2023	Handymax	48000	n.d.	Japan	n.d.	38
01.02.2023	Panamax	65000	n.d.	Japan	n.d.	24
01.02.2023	Handysize	33000	n.d.	Japan	n.d.	32
01.02.2023	Capesize	98000	n.d.	Japan	n.d.	65
01.03.2023	Handymax	49000	n.d.	Japan	n.d.	38
01.03.2023	Panamax	79000	n.d.	Japan	n.d.	36
01.03.2023	Handysize	34000	n.d.	Japan	n.d.	32
01.03.2023	Capesize	99000	n.d.	Japan	n.d.	66
01.04.2023	Handymax	50000	n.d.	Japan	n.d.	40
01.04.2023	Panamax	80000	n.d.	Japan	n.d.	36,5
01.04.2023	Handysize	35000	n.d.	Japan	n.d.	33
01.04.2023	Capesize	199000	n.d.	Japan	n.d.	68

Table 3

Descriptive statistics

Indicators	Deadweight	Building price of ship, USD mln
Average	81580,95238	41,90085714
Standard error	14915,54577	4,143663179
Median	63600	36,5
Mode	210000	32
Standard deviation	68351,61753	18,98865017
Sampling variance	4671943619	360,5688354
Kurtosis	-0,041106811	-1,064345863
Asymmetry	1,056200724	0,133194644
Amplitude	207000	61,182
Minimum	3000	6,818
Maximum	210000	68

Based on these data, correlation-regression analysis of the dependence of construction prices of bulk vessels of different classes on deadweight is performed. Figure 5 shows linear and non-linear regression models that demonstrate the dependence of the construction price on the deadweight of bulk vessels.

The linear correlation coefficient is 0.85, which indicates a close positive correlation between deadweight and construction prices in the bulk sector of the freight market within the experiment. The coefficients of determination for the polynomial and stepwise regression models exceed 0.8, which indicates that these models explain more than 80% of the dependence of the construction price on the deadweight of bulk vessels. A comparison of the coefficients of determination shows that the maximum coefficient is in the stepwise regression model (table 4). This means that of all the considered models, it most qualitatively explains the dependence of the price on the deadweight. Further, the calculation results should be adjusted taking into account commercial corrections for the delivery period, serial construction, payment terms, etc.

The implementation of the procedure for determining the level of the price of ship construction based on the market approach is presented in figure 6.

The customer often announces a closed tender for the construction of a vessel with certain technical and economic characteristics. But the shipyard that won the tender can take the position of a monopolist, and it will be very difficult to reach a compromise

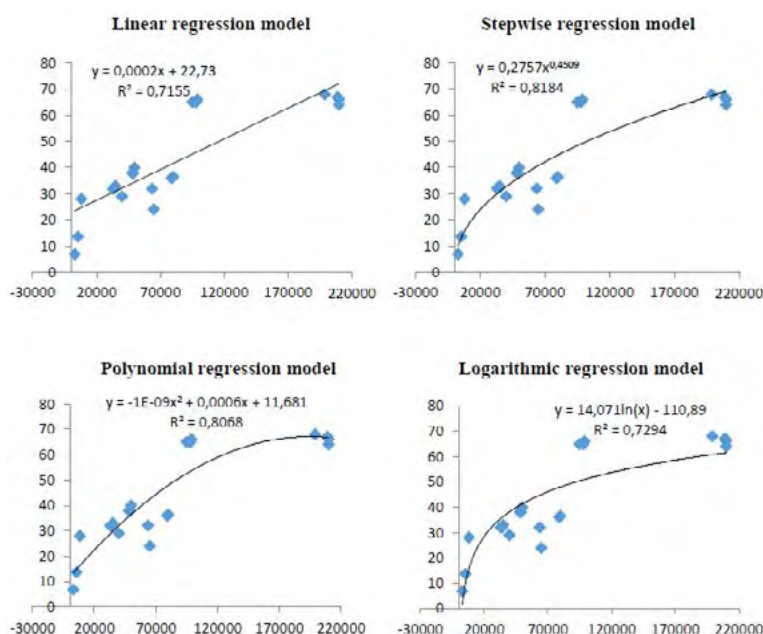


Fig. 5. Correlation-regression analysis of the dependence of ship construction prices from deadweight using different models

Table 4

Dependence of the ship construction price on deadweight

Regression model	Equation	Coefficient of determination (R ²)
Stepwise	$y = 0,2757x^{0,4509}$	0,8184
Polynomial	$y = -1E-09x^2 + 0,0006x + 11,681$	0,8068
Logarithmic	$y = 14,071\ln(x) - 110,89$	0,7294
Linear	$y = 0,0002x + 22,73$	0,7155

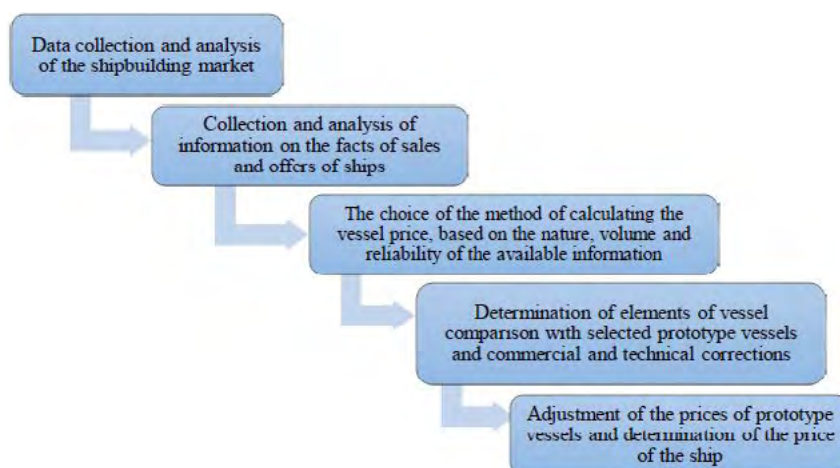


Fig. 6. Stages of the procedure for determining the ship construction price based on the market approach

with it when detailing the conditions of construction and delivery of the vessel. In order to avoid such situation, it is better to conduct the tender in two stages. At the first stage, two shipyards are determined, based on the price, delivery terms, financial and technological capabilities, as well as reputation. At the second stage, further coordination of the ship's construction conditions is simultaneously carried out with them.

Hull and machinery insurance (H&M) is a mandatory item of current expenses of shipping companies. Depending on the degree of protection, various types of damages are subject to compensation (Aligned Insurance, 2023) [14]. For example, CASCO insurance provides coverage for ships that are being operated and built, and the amount of coverage includes the ship's hull, engines and equipment. The market value of ships is closely related to the cost of H&M insurance, and also can affect the cost of P&I insurance (Gard News, 2005) [8]. The vessel value directly affects the premium, which is calculated on the basis of the insured value, other insurance conditions, and the right to claim compensation for total constructive loss and recovery of the share in the general average. If the vessel value changes significantly due to market fluctuations, it is advisable for both the insured and the insurer to request a change in the appraised value. If the estimated insurance value is too high, the shipowner pays too high premium for the risk of damage to the vessel, which increases operating expenditures and worsens the financial performance of the shipping company.

Conclusions. An analysis of the dynamics of shipbuilding prices on the example of the USA indicates their increase from 1985 to 2023 by almost 2.5 times. Construction costs of ships depend on fluctuations in the prices of steel, materials and equipment, the country of construction and labor cost standards. Shipbuilding prices are affected by the relationship between supply and demand in shipbuilding, exchange rate fluctuations, regulatory requirements and state credit and financial regulation of the shipbuilding industry. Demand from shipowners is influenced by global demand for sea transportation, current and forecast freight rates, market sentiment and expectations, pace of fleet renewal, credit and financial regulation of shipping industry, scrapping prices and the ratio of prices of new and second-hand ships.

The proposed classification of approaches to the estimation of prices for the construction of marine vessels involves the allocation of cost approach, intrinsic approach and market approaches. The cost approach takes into account the total costs of the shipyard for the ship construction and the projected profit. The intrinsic approach includes methods based on the determination of intrinsic value. The method of discounted free cash flows on equity, proposed within this approach, can be used for various chartering schemes. The market approach includes the methods of correlation-regression analysis, the method of parametric series, the method of specific indicators, and the engineering method.

The performed correlation-regression analysis of the dependence of the prices for the construction of bulk vessels of different classes on the deadweight indicates a close positive correlation between the deadweight and the construction prices of ships. Non-linear regression models sufficiently describe the dependence of the construction price of a certain type of ship on deadweight and can be used by shipowners to estimate the value of ships with further adjustment for commercial corrections.

In the case of tender pricing, it is advisable to conduct the competition in two stages.

The market value of the vessel directly affects the insurance premium and the terms of H&M insurance. In case of significant changes in the market price of the vessel after the conclusion of the insurance contract, it is necessary to change the appraised value of the vessel.

The practical value of the study is that the results can be useful for shipping and insurance companies in estimating the cost of building marine vessels in order to increase profitability and reduce financial risks. Methodical principles for calculating commercial corrections to the price of ship construction need further research.

BIBLIOGRAPHY

1. José M. L., Gordo M. Hull's manufacturing cost structure. *Shipbuilding*. V. 68. Pp. 1–24. doi: <http://dx.doi.org/10.21278/brod68301>.
2. Azhar A., Kristiyono T. A. Method for Estimating Cost of New Ship Building with Linear Regression. 2022. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. doi: 10.1088/1755-1315/972/1/012014.
3. Cost estimation in shipbuilding. Estimating and Optimizing Project Costs. CostFact. 2022. URL: <http://surl.li/jgrqt>.
4. Shuker L. Price determination in the shipbuilding market. BRS Group. URL: <https://www.oecd.org/sti/ind/shipbuilding-workshop-nov2018-3-1.pdf>.
5. Dai L., Hu H., Chen F. & Zheng J. The dynamics between newbuilding ship price volatility and freight volatility in dry bulk shipping market. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*. 2015. 7(4): 393. Pp. 393–406. doi: 10.1504/IJSTL.2015.069666.
6. Zhykharieva V., Shyriaieva L., Vlasenko O. Current trends of protectionism in shipping industry. *Transport Problems*. 2019. V. 14. Issue 2. Pp. 89–100. doi: 10.20858/tp.2019.14.2.8.
7. Knapp S., Heij C. Evaluation of total risk exposure and insurance premiums in the maritime industry. *Transportation Research*. Part D: Transport and Environment, 2017. V. 54. Pp. 321–334. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.001>.
8. Changes in ship values – influence on hull and machinery and P&I covers. *Gard News*, 2005, February 1. 177. URL: <http://surl.li/jhxov>.
9. U.S. Bureau of Labor Statistics, Producer Price Index by Industry: Ship Building and Repairing, FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis. 2023. URL: <https://fred.stlouisfed.org/series/PCU336611336611>.
10. Vessels Value: Newbuild Report 2021. International Shipping News. 2022. URL: <https://container-news.com/vesselsvalue-newbuild-report-2021/>.
11. 2022 Cargo Review: Newbuilding. International Shipping News. 2023. URL: <https://www.hellenicshippingnews.com/2022-cargo-review-newbuilding/>.
12. Japanese Newbuilding Ship Values. Simpson Spence Young. 2023, July 20. URL: <https://www.ssyonline.com/free-charts/japanese-newbuilding-shipvalues/#>.
13. Cargo Ship Price. Made-in-China, 2023, July 21. URL: https://www.made-in-china.com/products-search/hot-chinaproducts/Cargo_Ship_Price.html.
14. Hull and Machinery insurance explained. Aligned Insurance. 2023. URL: <https://www.alignedinsurance.com/hull-and-machinery-insuranceexplained/>.

REFERENCES

1. José, M. L., & Gordo, M. (2017). Hull's manufacturing cost structure. *Shipbuilding*, 68, 1-24. doi: <http://dx.doi.org/10.21278/brod68301>
2. Azhar, A., & Kristiyono, T. A. (2022). Method for Estimating Cost of New Ship Building with Linear Regression. IOP Conf. Ser. : Earth Environ. doi: 10.1088/1755-1315/972/1/012014
3. Cost estimation in shipbuilding. Estimating and Optimizing Project Costs (2022). CostFact. Retrieved from <http://surl.li/jgrqt>
4. Shuker, L. (2018). Price determination in the shipbuilding market. BRS Group. Retrieved from <https://www.oecd.org/sti/ind/shipbuilding-workshopnov2018-3-1.pdf>
5. Dai, L., Hu, H., Chen, F., & Zheng, J. (2015). The dynamics between newbuilding ship price volatility and freight volatility in dry bulk shipping market. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 7(4): 393, 393–406. doi: 10.1504/IJSTL.2015.069666
6. Zhykharieva, V., Shyriaieva, L., & Vlasenko, O. (2019). Current trends of protectionism in shipping industry. *Transport Problems*, 14. 2, 89-100. doi: 10.20858/tp.2019.14.2.8
7. Knapp, S., & Heij, C. (2017). Evaluation of total risk exposure and insurance premiums in the maritime industry. *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*, 54, 321–334. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.001>
8. Changes in ship values – influence on hull and machinery and P&I covers (2005). *Gard News*, 2005, February 1, 177. Retrieved from <http://surl.li/jhxov>
9. U.S. Bureau of Labor Statistics (2023). Producer Price Index by Industry: Ship Building and Repairing, FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis. Retrieved from <https://fred.stlouisfed.org/series/PCU336611336611>
10. Vessels Value: Newbuild Report 2021. International Shipping News (2022). Retrieved from <https://container-news.com/vesselsvalue-newbuild-report2021/>
11. 2022 Cargo Review: Newbuilding. International Shipping News (2023). Retrieved from <https://www.hellenicshippingnews.com/2022-cargoreview-newbuilding/>
12. Japanese Newbuilding Ship Values. Simpson Spence Young (2023, July 20). Retrieved from <https://www.ssyonline.com/free-charts/japanese-newbuildingship-values/#>
13. Cargo Ship Price. Made-in-China (2023, July 21). Retrieved from https://www.made-in-china.com/products-search/hot-chinaproducts/Cargo_Ship_Price.html
14. Hull and Machinery insurance explained. Aligned Insurance (2023). Retrieved from <https://www.alignedinsurance.com/hull-and-machineryinsurance-explained/>

АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ В ДУОПОЛІЇ КУРНО – БЕРТРАНА З ДИФЕРЕНЦІЙОВАНИМИ ПРОДУКТАМИ

С.В. Мельников

к.е.н., доцент, доцент кафедри підприємництва і туризму,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-2627-9463

Анотація

Вступ. Вже протягом багатьох років моделі Курно та Бертрана є важливими інструментами для аналізу конкурентної динаміки на ринку та розуміння того, як фірми приймають рішення щодо ціноутворення та виробництва. В моделі Курно фірми встановлюють обсяг виробництва, в моделі Бертрана – ціну. Незважаючи на свою ідеалізацію та деякі спрощення, ці моделі й досі мають актуальність та важливість для досліджень конкурентних процесів. На основі проведених економістами досліджень цінової та кількісної конкуренції на ринку олігополії можна стверджувати, що не існує такого виду конкуренції, який мав би абсолютну перевагу. В залежності від характеристик ринків, оптимальним буде той чи інший вид конкуренції. В той же час на практиці зустрічаються ринки, де одні фірми встановлюють обсяг пропозиції, а інші – ціну. На сьогодні моделі таких ринків не так добре досліджені, як моделі конкуренції тільки за Курно або тільки за Бертраном. **Метою** даної роботи є визначення та аналіз стійкості рівноваги у моделі просторової дуополії (Liang, W.J., Hwang, H., & Mai, C.C., (2006). *Spatial discrimination: Bertrand vs. Cournot with asymmetric demands. Regional Science and Urban Economics*, 36, 790-802) в умовах продуктової диференціації та асиметрії розмірів ринків. З метою максимізації прибутку фірми спочатку вибирають місце розташування, а потім вид конкуренції – за Курно або Бертраном. **Результати.** В роботі визначено стан рівноваги за Нешем у просторовій дуополії, коли одна з фірм встановлює обсяг пропозиції, а інша встановлює ціну. Досліджена стійкість рівноваги за Нешем. Визначена залежність області стійкості рівноваги від асиметрії розмірів ринків та продуктової диференціації. Виявлено нетривіальний вплив асиметрії і диференціації на конкурентну динаміку фірм та стійкість ринкової рівноваги. Результати аналізу представлено на карті динамічних режимів та біфуркаційних діаграмах. **Висновки.** В роботі доведено, що зростання рівня взаємозамінності (взаємодоповнюваності) збільшує (зменшує) площу області стійкості. Високий рівень взаємозамінності підсилює рівень конкуренції між фірмами та, одночасно, збільшує площу області стійкості. Високий рівень взаємодоповнюваності мотивує фірми до агломерації та, одночасно, зменшує площу області стійкості такої рівноваги.

Ключові слова: дуополія Курно – Бертрана, асиметрія ринків, продуктова диференціація, стійкість, біфуркація.

STABILITY ANALYSIS IN A COURNOT – BERTRAND DUOPOLY
WITH DIFFERENTIATED PRODUCTS

S.V. Melnikov

PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department
of Entrepreneurship & Tourism,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-2627-9463

Summary

Introduction. For many years, the Cournot and Bertrand models have been important tools for analyzing competitive market dynamics and understanding how firms make pricing and production decisions. In the Cournot model, firms set the volume of production, in the Bertrand model – the price. Despite their idealization and some simplifications, these models still have relevance and importance for the research of competitive processes. On the basis of studies conducted by economists on price and quantity competition in the oligopoly market, it can be argued that there is no such type of competition that would have an absolute advantage. Depending on the characteristics of the markets, one or another type of competition will be optimal. At the same time, in practice there are markets where some firms set the volume of supply, while others set the price. To date, the models of such markets are not as well researched as the Cournot-only or Bertrand-only competition models. **The purpose** of this paper is to define and analyze the stability of the equilibrium in the spatial duopoly model (Liang, W.J., Hwang, H., & Mai, C.C., (2006). *Spatial discrimination: Bertrand vs. Cournot with asymmetric demands. Regional Science and Urban Economics*, 36, 790-802) under conditions of product differentiation and asymmetry of market sizes. In order to maximize profits, firms first select a location and then the type of competition – Cournot or Bertrand. **Results.** The paper defines the state of Nash equilibrium in a spatial duopoly, when one of the firms sets the volume of supply, and the other sets the price. The stability of the Nash equilibrium was investigated. The dependence of the area of equilibrium stability on the asymmetry of market sizes and product differentiation is determined. The non-trivial impact of asymmetry and differentiation on the competitive dynamics of firms and the stability of market equilibrium has been revealed. The results of the analysis are presented on a map of dynamic modes and bifurcation diagrams. **Conclusions.** The paper proves that the growth of the level of substitutability (complementarity) increases (decreases) the area of the stability region. A high level of substitutability strengthens the level of competition between firms and, at the same time, increases the area of the stability region. A high level of complementarity motivates firms to agglomerate and, at the same time, reduces the stability region of such an equilibrium.

Key words: Cournot – Bertrand duopoly, markets asymmetry, product differentiation, stability, bifurcation.

Вступ та постановка проблеми. Вже протягом багатьох років економісти обговорюють переваги цінової та кількісної конкуренції на ринку олігополії. На сьогодні можна стверджувати, що не існує такого виду конкуренції, який мав би абсолютну перевагу. Залежно від характеристик ринків, що моделюються, оптимальним буде той чи інший вид конкуренції.

В одній з перших ґрунтовних робіт із цієї тематики [1] показано, що фірми вибирають конкуренцію за Курно тільки при взаємозамінності, а при взаємодоповнюваності їм вигідна конкуренція за Бертраном. При цьому для споживачів конкуренція за Бертраном вигідна незалежно від виду продуктової диференціації.

Дослідження впливу виду конкуренції на процеси агломерації і дисперсії фірм в просторових моделях проведено у роботах [2–7]. Отримано, що при цінової конкуренції фірми будуть прагнути до максимальної дисперсії для подолання парадоксу Бертрана. При кількісної конкуренції розташування фірм істотно залежить від транспортних витрат. Низькі транспортні витрати стимулюють фірми агломеруватись і продавати на всіх ринках. При високих транспортних витратах фірмам вигідно монополізувати найближчий ринок і мінімізувати поставки на сусідні ринки.

Подальші дослідження пов'язані з урахуванням в просторових моделях продуктової диференціації [8\$ 9] та асиметрії розмірів ринків [10]. В [8; 9] показано, що взаємозамінність (взаємодоповнюваність) продуктів підсилює прагнення фірм до дисперсії (агломерації). Урахування асиметрії розмірів ринків в [10] призвело до зворотних від [1] результатів. Отримано, що при досить високій асиметрії ринків фірмам може бути вигідна цінова, а споживачам – кількісна конкуренція.

Значимо, що на практиці зустрічаються ринки, де одні фірми встановлюють обсяг пропозиції, а інші – ціну. На сьогодні моделі таких ринків не так добре досліджені, як моделі конкуренції тільки за Курно або тільки за Бертраном. Серед праць, присвячених даній проблематиці, відзначимо роботи [11–15].

Метою роботи є визначення та аналіз стійкості рівноваги в просторовій дуополії [10] при конкуренції за Курно-Бертраном.

Виклад основного матеріалу.

1. Модель

Два ринки розташовані на кінцях лінії одиничної довжини. Між ринками існує асиметрія – розмір ринку з лівого боку (L) перевищує розмір ринку з правого боку (S). На лінії конкурують дві фірми з індексами i та j , $i, j = 1, 2, i \neq j$, фірма i конкурує за Курно, а фірма j конкурує за Бертраном. На обох ринках фірми продають диференційовану продукцію, арбітраж між споживачами виключений. Відстань фірми j до L -ринку дорівнює x_j . Обмеження на взаємне розташування фірм відсутні. Кожна фірма несе транспортні витрати на постачання одиниці продукції на одиницю відстані. Мета фірм полягає в максимізації свого прибутку. Для побудови функцій попиту скористаємося квадратичною функцією корисності з [1]:

$$U^L = q_i^L + q_j^L - \frac{(q_i^L)^2 + 2\phi q_i^L q_j^L + (q_j^L)^2}{2\gamma},$$

$$U^S = q_i^S + q_j^S - \frac{(q_i^S)^2 + 2\phi q_i^S q_j^S + (q_j^S)^2}{2},$$

де q_i^L, q_i^S – обсяги пропозиції фірми i на L і S ринках відповідно; ϕ – коефіцієнт продуктової диференціації, $0 < |\phi| < 1$; $\gamma > 1$ – коефіцієнт асиметрії ринків. Цільові функції споживачів на ринках:

$$U^L - p_i q_i^L - p_j q_j^L \rightarrow \max_{q_i^L, q_j^L}, U^S - p_i q_i^S - p_j q_j^S \rightarrow \max_{q_i^S, q_j^S} \quad (1)$$

де $p_i > 0, p_j > 0$ – ціни на продукцію фірм.

З умов першого порядку для функцій (1), знаходимо функції попиту:

$$p_i^L = 1 - \phi - \frac{1 - \phi^2}{\gamma} q_i^L + \phi p_j^L, \quad p_i^S = 1 - \phi - q_i^S(1 - \phi^2) + \phi p_j^S,$$

$$q_j^L = \gamma - \gamma p_j^L - \phi q_i^L, \quad q_j^S = 1 - p_j^S - \phi q_i^S.$$

Прийемо, що фірми покривають обидва ринки, тобто $q_i^L > 0$, $q_i^S > 0$.
Цільові функції фірм:

$$F_i^{C-B} = q_i^L(p_i^L - tx_i) + q_i^S(p_i^S - t(1 - x_i)) \rightarrow \max_{q_i^L, q_i^S},$$

$$F_j^{C-B} = q_j^L(p_j^L - tx_j) + q_j^S(p_j^S - t(1 - x_j)) \rightarrow \max_{p_j^L, p_j^S}.$$

Конкурентна гра складається з двох етапів. На першому етапі фірми одночасно вибирають своє місце розташування. На другому етапі, з огляду на рішення про місце розташування, фірма i встановлює обсяги пропозиції, а фірма j встановлює ціни. Рівновага моделі знаходиться за допомогою методу зворотної індукції.

2. Рівновага

Згідно з методом зворотної індукції починаємо з другого етапу. З умов оптимальності першого порядку отримуємо криві реакції фірм:

$$q_i^L = \gamma \frac{1 - \phi + \phi p_j^L - tx_i}{2(1 - \phi^2)}, \quad q_i^S = \frac{1 - \phi + \phi p_j^S - t(1 - x_i)}{2(1 - \phi^2)},$$

$$p_j^L = \frac{\gamma - \phi q_i^L + \gamma tx_j}{2\gamma}, \quad p_j^S = \frac{1 - \phi q_i^S + t(1 - x_j)}{2}. \quad (2)$$

Розв'язуючи системи рівнянь (2), знаходимо рівноважні обсяги пропозицій та ціни:

$$q_i^L = \gamma \frac{2 - \phi - 2tx_i + \phi tx_j}{4 - 3\phi^2}, \quad q_i^S = \frac{2 - \phi - 2t(1 - x_i) + \phi t(1 - x_j)}{4 - 3\phi^2},$$

$$p_j^L = \frac{2 - \phi - \phi^2 + 2tx_j(1 - \phi^2) + \phi tx_i}{4 - 3\phi^2},$$

$$p_j^S = \frac{2 - \phi - \phi^2 + 2t(1 - x_j)(1 - \phi^2) + \phi t(1 - x_i)}{4 - 3\phi^2}.$$

Умови покриття ринків:

$$q_i^L > 0 \Leftrightarrow t < t_{cov} = \frac{2 - \phi}{2x_i - \phi x_j},$$

$$q_j^L > 0 \Leftrightarrow t < t_{cov} = \frac{2 - \phi - \phi^2}{(2 - \phi^2)x_j - \phi x_i},$$

$$q_i^S > 0 \Leftrightarrow t < t_{cov} = \frac{2 - \phi}{2(1 - x_i) - \phi(1 - x_j)},$$

$$q_j^S > 0 \Leftrightarrow t < t_{cov} = \frac{2 - \phi - \phi^2}{(2 - \phi^2)(1 - x_j) - \phi(1 - x_i)}. \quad (3)$$

Прибутки:

$$F_i^{C-B} = (1 - \phi^2) \left((q_i^L)^2 / \gamma + (q_i^S)^2 \right), \quad F_j^{C-B} = (q_j^L)^2 / \gamma + (q_j^S)^2. \quad (4)$$

На основі результатів [9] порівняємо рівноважні прибутки фірм у дуополії Курно-Бертрана з прибутками фірм у дуополіях Курно та Бертрана:

$$F_i^{C-B} = \xi F_i^{C-C}, \quad F_j^{C-B} = \xi F_j^{B-B}, \quad 0 < \xi = \frac{(4 - 3\phi^2)^2 - \phi^6}{(4 - 3\phi^2)^2} < 1.$$

Таким чином, у дуополії Курно-Бертрана фірмі i вигідно щоб фірма j конкурувала за Курно, а фірмі j вигідно щоб фірма i конкурувала за Берtrandом.

На першому етапі фірми оптимізують своє місце розташування при даному місці розташування конкурента. З умов другого порядку (5) випливає, що функції прибутку (4) строго опуклі вниз за місцем розташування:

$$\frac{\partial^2 F_i^{C-B}}{\partial x_i^2} = \frac{8t^2(\gamma + 1)(1 - \phi^2)}{(4 - 3\phi^2)^2} > 0, \quad \frac{\partial^2 F_j^{C-B}}{\partial x_j^2} = \frac{2t^2(\gamma + 1)(2 - \phi^2)^2}{(4 - 3\phi^2)^2} > 0. \quad (5)$$

Таким чином, в стані рівноваги фірми будуть розташовуватися тільки на ринках, незалежно від рівня транспортних тарифів. Всього можливі чотири варіанти рівноважного розташування фірм (x_i, x_j) : агломерація $(0, 0)$, $(1, 1)$, та дисперсія $(0, 1)$, $(1, 0)$.

Знаючи рівноважні розташування фірм, ми можемо завершити аналіз умов покриття ринків (3).

У випадку агломерації фірми зможуть поставити товар на сусідній ринок за умови: $t_{cov}^{agg} < 1$. У випадку дисперсії фірми зможуть поставити товар на сусідній ринок за умови: $t_{cov}^{dis} < \min\left\{\frac{2-\phi}{2}; \frac{2-\phi-\phi^2}{2-\phi^2}\right\}$. Таким чином, у випадку дисперсії фірми більш чутливі до зміни транспортного тарифу при взаємозамінних продуктах.

Однією з цілей даної роботи є аналіз стійкості рівноваги Курно-Бертрана. Рівноважне розташування фірм залежить від співвідношення між рівнями асиметрії, диференціації та транспортного тарифу. З можливих ситуацій розглянемо випадок високого рівня асиметрії. У [9; 10] доводиться, що за достатньо високої асиметрії фірми прагнуть до агломерації на L -ринку. Отже, проаналізуємо стійкість рівноваги на L -ринку при агломерації фірм на L -ринку.

3. Аналіз стійкості

Приймемо, що фірми конкурують в умовах неповної інформації та приймають рішення на основі динаміки свого очікуваного граничного прибутку [16]. Тоді конкурентну взаємодію фірм можна представити у вигляді двовимірного відображення:

$$\begin{aligned} q_i^L(n+1) &= q_i^L(n) \left[1 + \alpha \frac{\partial F_i^L}{\partial q_i^L} \right] = \\ &= q_i^L(n) \left[1 + \alpha \left(1 - \phi - 2 \frac{1 - \phi^2}{\gamma} q_i^L(n) + \phi p_j(n) \right) \right], \\ p_j^L(n+1) &= p_j^L(n) \left[1 + \beta \frac{\partial F_j^L}{\partial p_j^L} \right] = p_j^L(n) \left[1 + \beta (\gamma - 2\gamma p_j^L(n) - \phi q_i^L(n)) \right]. \quad (6) \end{aligned}$$

де n – момент часу, $n = 0, 1, 2, \dots$; параметри $\alpha > 0$ та $\beta > 0$ характеризують відносний приріст на одиницю граничного прибутку (швидкість адаптації).

Відображення (6) має чотири нерухомі точки періоду один:

$$E_1(0, 0), E_2\left(0, \frac{1}{2}\right), E_3\left(\frac{\gamma}{2(1+\phi)}, 0\right), E^*(q_i^*, p_j^*),$$

де $E^*(q_i^*, p_j^*)$ – точка рівноваги за Нешем, $q_i^* = \frac{\gamma(2-\phi)}{4-3\phi^2}$, $p_j^* = \frac{2-\phi-\phi^2}{4-3\phi^2}$.

Точки E_1, E_2 та E_3 не задовольняють обмеженням моделі і в подальшому не розглядаються. Дослідимо стійкість рівноваги за Нешем.

Характер стійкості нерухомої точки визначається властивостями матриці Якобі. Матриця Якобі відображення (6)

$$J = \begin{pmatrix} 1 + \alpha \left(1 - \phi - 4 \frac{1-\phi^2}{\gamma} q_i^L(n) + \phi p_j(n) \right) & \alpha \phi q_i^L(n) \\ -\beta \phi p_j^L(n) & 1 + \beta (\gamma - 4\gamma p_j^L(n) - \phi q_i^L(n)) \end{pmatrix} \quad (7)$$

Матриця Якобі відображення (7) у нерухомій точці E^* :

$$J(E^*) = \begin{pmatrix} 1 - \frac{2\alpha(1-\phi^2)(2-\phi)}{4-3\phi^2} & \frac{\alpha\phi\gamma(2-\phi)}{4-3\phi^2} \\ -\frac{\beta\phi(1-\phi)(2+\phi)}{4-3\phi^2} & 1 - \frac{2\beta\gamma(1-\phi)(2+\phi)}{4-3\phi^2} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Для аналізу стійкості нерухомої точки E^* визначимо інваріанти матриці (8):

$$T = Tr(J(E^*)) = 2 - 2(\alpha\phi_1 + \beta\gamma\phi_2),$$

$$D = Det(J(E^*)) = 1 - 2(\alpha\phi_1 + \beta\gamma\phi_2) + \alpha\beta\gamma\phi_3, \quad (9)$$

де $\phi_1 = \frac{(1-\phi^2)(2-\phi)}{4-3\phi^2} > 0$; $\phi_2 = \frac{(1-\phi)(2+\phi)}{4-3\phi^2} > 0$; $\phi_3 = \frac{(1-\phi)(4-\phi^2)}{4-3\phi^2} > 0$.

Відповідно до критерію Джурі, відображення (6) у нерухомій точці E^* є стійким за умов:

$$\begin{aligned} 1 - T + D > 0 &\Leftrightarrow \alpha\beta\gamma\phi_3 > 0, \\ 1 + T + D > 0 &\Leftrightarrow \beta < \frac{4(1-\alpha\phi_1)}{\gamma(4\phi_2 - \alpha\phi_3)}, \\ D < 1 &\Leftrightarrow \beta < \frac{2\alpha\phi_1}{\gamma(\alpha\phi_3 - 2\phi_2)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Нерівності (10) визначають область, в якій нерухома точка E^* є стійкою. З (10) випливає, що перша нерівність завжди виконується, тобто дотична біфуркація відсутня. При порушенні другої нерівності, $\beta^{flip} = \frac{4(1-\alpha\phi_1)}{\gamma(4\phi_2 - \alpha\phi_3)}$, виникають стійкі коливання показників, що супроводжуються каскадом біфуркацій подвоєння періоду. При порушенні третьої нерівності, $\beta^{NS} = \frac{2\alpha\phi_1}{\gamma(\alpha\phi_3 - 2\phi_2)}$, відбувається біфуркація Неймарка-Сакера й динаміка показників переходить у квазіперіодичний режим.

Таким чином, область стійкості відображення (6) у нерухомій точці E^* визначається наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} 0 < \beta < \beta^{flip} & \quad 0 < \alpha \leq \min\{\alpha_1, \alpha_2\}, \\ 0 < \beta < \beta^{NS} & \quad \min\{\alpha_1, \alpha_2\} < \alpha \leq \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}, \\ \beta^{flip} < \beta < \beta^{NS} & \quad \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} < \alpha \leq \max\{\alpha_1, \alpha_2\}, \end{aligned} \quad (11)$$

де $\alpha_1 = \frac{1-\phi_4}{\phi_1}$, $\alpha_2 = \frac{1+\phi_4}{\phi_1}$, $\phi_4 = \frac{\phi}{\sqrt{4-3\phi^2}}$.

Область стійкості на площині параметрів (α, β) представлено на рис. 1(а). Темнішим відтінком позначена область, в якій мультиплікатори є комплексно-спряженими. Ця область обмежена двома лініями (12), отриманими з умови $D = T^2/4$

$$\beta_{1,2} = \alpha \frac{\phi_3 - 2\phi_1\phi_2 \pm \phi_3\phi_4}{2\gamma\phi_2^2}. \quad (12)$$

Далі розглянемо біфуркацію корозмірності 2, а саме резонанс 1:2. Цій біфуркації відповідають точки перетину ліній біфуркації подвоєння періоду та біфуркації Неймарка-Сакера. Тобто вона має місце при одночасному виконанні умов:

$$1 + T + D = 0 \text{ та } D = 1. \quad (13)$$

З (13) випливає, що криві β^{flp} та β^{NS} перетинаються у точках $(\alpha_1, \beta^{NS}(\alpha_1))$ та $(\alpha_2, \beta^{NS}(\alpha_2))$, які і є точками резонансу 1:2.

З (11) випливає, що площа області стійкості обернено пропорційна асиметрії ринків. Зростання асиметрії стискає область стійкості по осі β , та навпаки. Таким чином, вплив асиметрії ринків має двоякий ефект. Високий рівень асиметрії, з одного боку, збільшує попит на L -ринку, а з іншого боку зменшує область стійкості ринкової рівноваги.

Вплив продуктової диференціації не такий очевидний. Для аналізу впливу диференціації визначимо площу області стійкості як функцію асиметрії та диференціації:

$$S = \int_0^{\min\{\alpha_1, \alpha_2\}} \beta^{flp} d\alpha + \int_{\min\{\alpha_1, \alpha_2\}}^{\max\{\alpha_1, \alpha_2\}} \beta^{NS} d\alpha - \int_{\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}}^{\max\{\alpha_1, \alpha_2\}} \beta^{flp} d\alpha.$$

Залежність площі області стійкості від диференціації за фіксованого рівня асиметрії представлена на рис. 1(б).

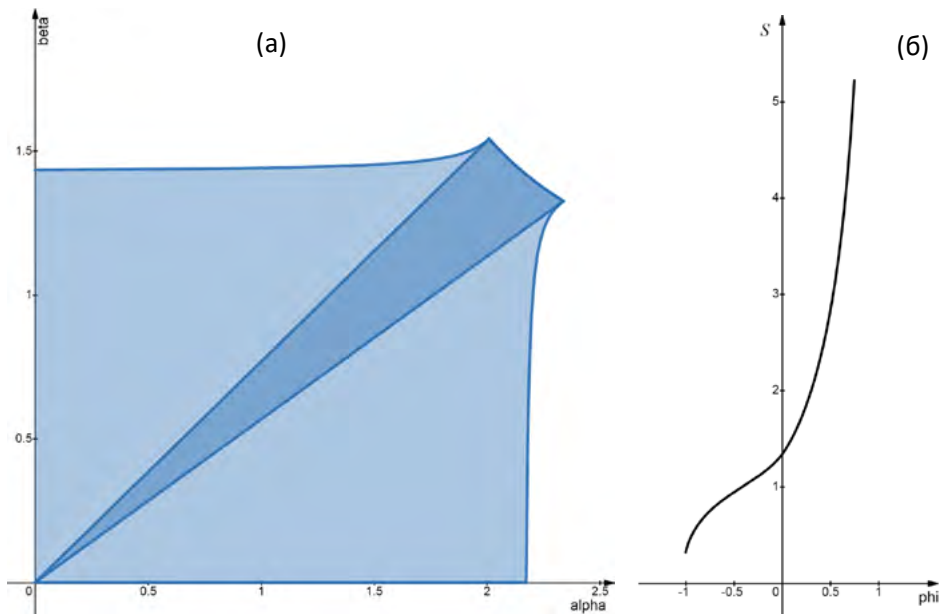


Рис. 1. (а) Область стійкості нерухомої точки E^* на площині параметрів (α, β) при $\gamma = 1,5$, $\phi = 0,15$. (б) Залежність площі області стійкості від диференціації при $\gamma = 3$

Джерело: власна розробка

Таким чином, зростання рівня взаємозамінності (взаємодоповнюваності) збільшує (зменшує) площу області стійкості. Отже, вплив продуктової диференціації також виявився нетривіальним. Високий рівень взаємозамінності підсилює рівень конкуренції між фірмами та, одночасно, збільшує площу області стійкості. Високий рівень взаємодоповнюваності мотивує фірми до агломерації та, одночасно, зменшує стійкість такої рівноваги.

Отримані результати дозволяють встановити граничні значення швидкості адаптації фірм. З рис. 1(а) бачимо, що рівновага втрачає стійкість при $\alpha > 2,1$ або $\beta > 1,4$. Таким чином, фірма, яка конкурує за Бертраном, є більш чутливою до зміни швидкості адаптації.

Наступний етап дослідження проведемо за допомогою комп'ютерного моделювання в програмі E&F Chaos. Прийемо початкові умови: $q(0) = p(0) = 0,1$. Карту динамічних режимів на площині параметрів (α, β) представлено на рис. 2.

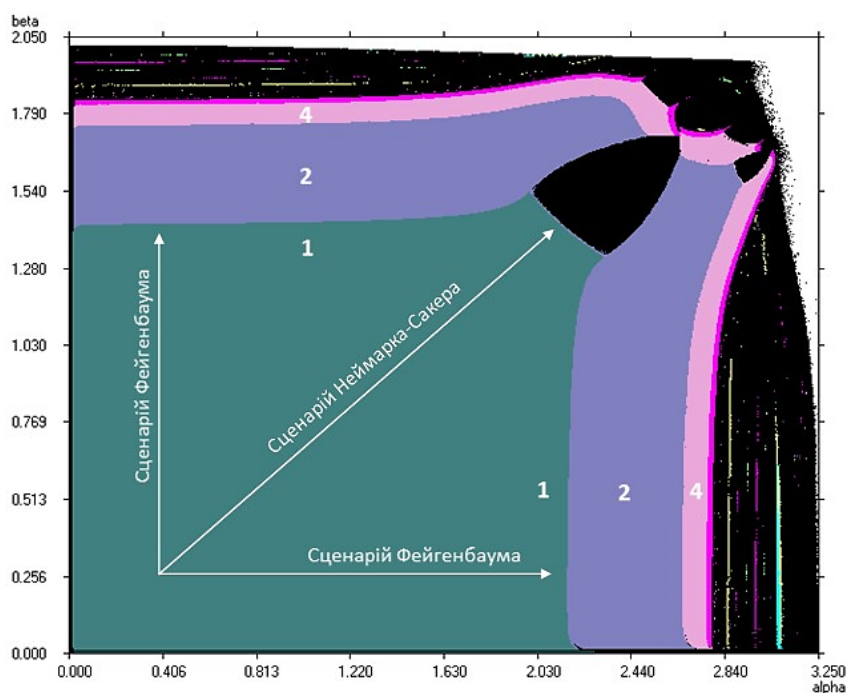


Рис. 2. Карта динамічних режимів на площині параметрів (α, β) при $\gamma = 1,5$, $\phi = 0,15$. Цифрами позначені періоди режимів, чорна область відповідає хаосу, біла – розбіжності траєкторій

Джерело: власна розробка

На рис. 2 період 1 відповідає рівновазі за Нешем. Зі зростанням параметрів α та β можлива динаміка за сценарієм Фейгенбаума або Неймарка-Сакера. За сценарієм Фейгенбаума виникають стійкі коливання показників, що супроводжуються каскадом біфуркацій подвоєння періоду, спочатку періоду 2, потім 4 та 8. За сценарієм Неймарка-Сакера динаміка показників переходить у квазіперіодичний режим. Біфуркаційні лінії на поверхні параметрів представляються межами відповідних областей. Вони накопичуються до критичної лінії, яка є межею хаосу.

Зазначимо, що перехід до сценарію Фейгенбаума можливий не лише напряму зі стану рівноваги, а й через область хаосу. Наприклад, за фіксованого значення параметра $\beta = 1,4$ та зростання параметра α стан рівноваги переходить у режим хаосу, який потім змінюється каскадом біфуркацій подвоєння періоду. Відповідні біфуркаційні діаграми для рівноважного обсягу пропозиції фірми i представлені на рис. 3.

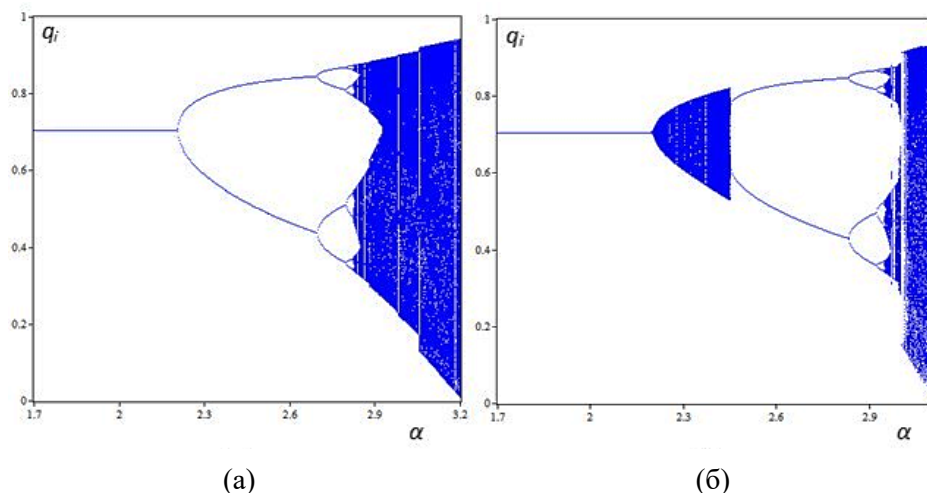


Рис. 3. Біфуркаційні діаграми для обсягу пропозиції i -ї фірми при $\gamma = 1,5$, $\phi = 0,15$. (а) $\beta = 1$ та $1,7 \leq \alpha \leq 3,2$. (б) $\beta = 1,4$ та $1,7 \leq \alpha \leq 3,1$

Зростання рівня диференціації призводить до збільшення області розбіжності траєкторій по осі β та появи областей квазіперіодичних режимів за сценарієм Неймарка-Сакера. Розглянемо це на прикладі взаємозамінності.

Наприклад, при $\phi = 0,35$ з'являються області циклів довжиною 3, 6 та 7 (рис. 4). При $\phi = 0,5$ 3-цикл та 6-цикл зміщуються у напрямку лінії біфуркації Неймарка-Сакера, у 7-цикла зменшується, а у 5-цикла збільшується площа (рис. 5).

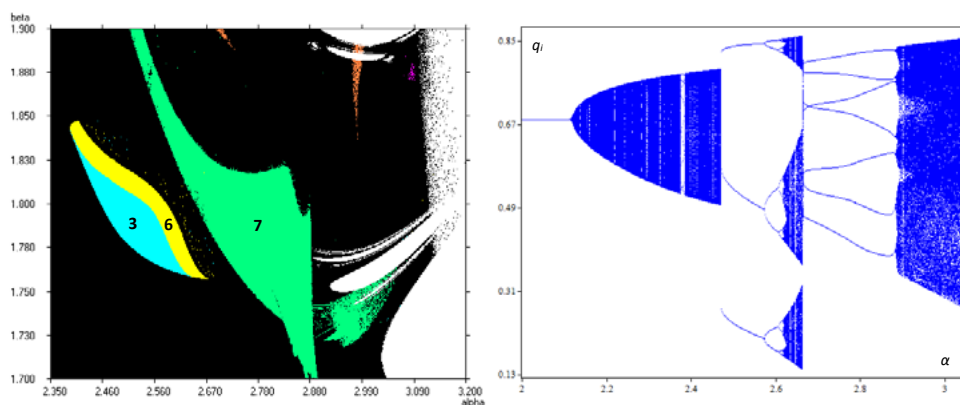


Рис. 4. Карта режимів при $\gamma = 1,5$, $\phi = 0,35$, $1,7 \leq \beta \leq 1,9$, $2,35 \leq \alpha \leq 3,2$ та біфуркаційна діаграма при $\gamma = 1,5$, $\phi = 0,35$, $\beta = 1,79$, $2 \leq \alpha \leq 3,05$

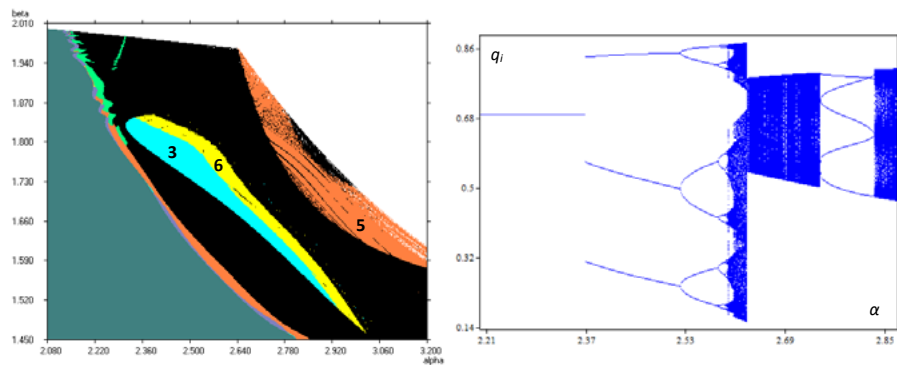


Рис. 5. Карта режимів при $\gamma = 1,5$, $\phi = 0,5$, $1,45 \leq \beta \leq 2,01$, $2,08 \leq \alpha \leq 3,2$ та біфуркаційна діаграма при $\gamma = 1,5$, $\phi = 0,5$, $\beta = 1,79$, $2,2 \leq \alpha \leq 2,87$

Зростання взаємозамінності до $\phi = 0,65$ призводить до виникнення області значень параметрів α і β , за яких може реалізуватися як стійка стаціонарна точка, так і стійкі цикли довжиною 3 та 6, тобто виникає мультистабільність. Перехід до стійкої рівноваги або до 3-циклу, а потім 6-циклу залежить від початкових умов. Дослідимо – як впливає початкове значення ціни фірми j на карти режимів та динаміку рівноважного обсягу пропозиції фірми i . Результати моделювання представлено на рис. 6 та рис. 7.

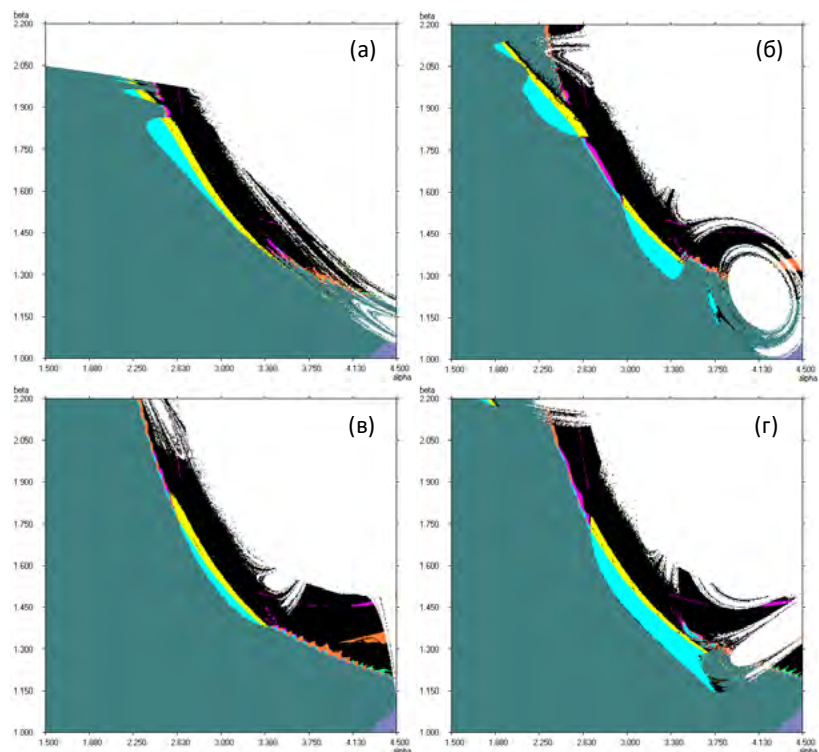


Рис. 6. Карта режимів при $\gamma = 1,5$, $\phi = 0,65$, $1 \leq \beta \leq 2,2$, $1,5 \leq \alpha \leq 4,5$, $q(0) = 0,1$.
(а) $p(0) = 0,1$. (б) $p(0) = 0,2$. (в) $p(0) = 0,5$. (г) $p(0) = 0,6$

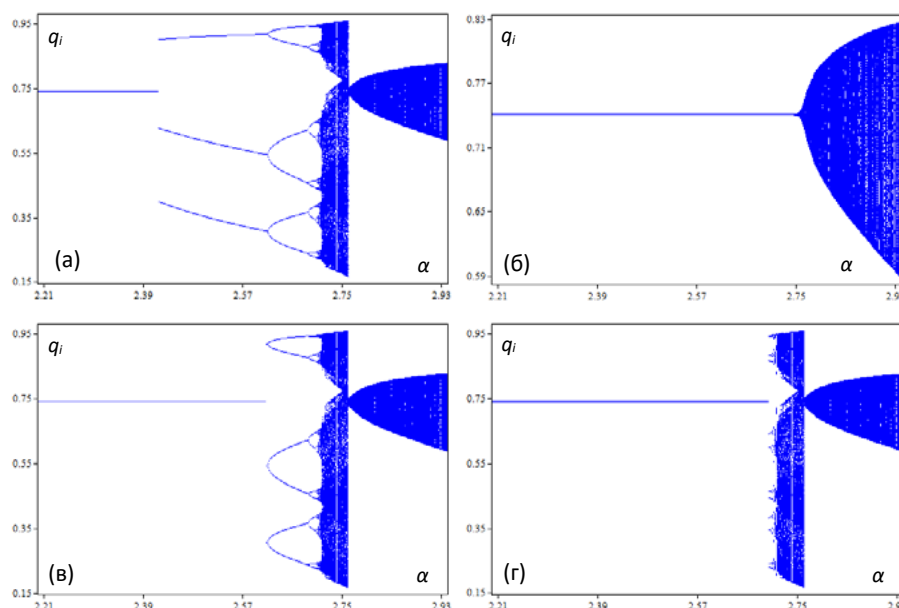


Рис. 7. Біфуркаційні діаграми при $\gamma = 1,5$, $\phi = 0,65$, $\beta = 1,79$, $2,2 \leq \alpha \leq 2,94$, $q(0) = 0,1$. (а) $p(0) = 0,1$. (б) $p(0) = 0,2$. (в) $p(0) = 0,5$. (г) $p(0) = 0,6$

На рис. 7 бачимо, що в залежності від початкового рівня ціни рівноважний обсяг пропозиції до лінії Неймарка-Сакера може переходити: (а) спочатку 3-цикл, потім каскад біфуркацій подвоєння; (б) напряму до хаосу за сценарієм Неймарка-Сакера; (в) спочатку 6-цикл, потім каскад біфуркацій подвоєння; (г) цикли вищих порядків та каскад біфуркацій подвоєння.

Подальше підвищення взаємозамінності призводить до зникнення квазіперіодичних режимів.

Висновки. У роботі визначено стан рівноваги за Нешем у просторовій дуополії, коли одна з фірм встановлює обсяг пропозиції, а інша встановлює ціну. Отримано, що у рівноважному стані дуополії Курно-Бертрана фірмі i вигідно щоб фірма j конкурувала за Курно, а фірмі j вигідно, щоб фірма i конкурувала за Бертраном.

Визначена залежність області стійкості рівноваги від асиметрії розмірів ринків. Отримано, що площа області стійкості обернено пропорційна асиметрії ринків. Зростання асиметрії стискає область стійкості по осі β , та навпаки. Таким чином, асиметрія ринків має двоякий ефект. Високий рівень асиметрії, з одного боку, збільшує попит на L -ринку, а з іншого боку, зменшує область стійкості ринкової рівноваги.

Встановлена залежність області стійкості рівноваги від продуктової диференціації. Отримано, що зростання рівня взаємозамінності (взаємодоповнюваності) збільшує (зменшує) площу області стійкості. Високий рівень взаємозамінності підсилює рівень конкуренції між фірмами та, одночасно, збільшує площу області стійкості. Високий рівень взаємодоповнюваності мотивує фірми до агломерації та, одночасно, зменшує стійкість такої рівноваги.

Подальші дослідження пов'язані з аналізом стійкості рівноваги в умовах інформаційної асиметрії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Singh N., Vives X. Price and quantity competition in a differentiated duopoly. *Rand Journal of Economics*. 1984. N 15. pp. 546–554.
2. Anderson S., Neven D. Cournot competition yields spatial agglomeration. *International Economic Review*. 1991. V. 32. N 4. pp. 793–808.
3. Hamilton J., Thisse J.-F., Weskamp A. Spatial discrimination, Bertrand vs. Cournot in a model of location choice. *Regional Science and Urban Economics*. 1989. N 19. pp. 87–102.
4. Melnikov S.V. Location choice of firms under Stackelberg information asymmetry. *Transport & Logistics*. 2018. № 18(44). С. 35–44.
5. Melnikov S.V. Cournot competition yields spatial dispersion. *Розвиток транспорту*. 2019. № 1(4). С. 57–70.
6. Melnikov S.V. Stackelberg-Nash equilibrium in the linear city model. *Automation and Remote Control*. 2020. № 81(2). pp. 358–365.
7. Мельников С.В. Конкуренція за Курно та Бертраном в умовах просторової дуополії з асиметричними ринками. *Розвиток транспорту*. 2021. № 3(10). С. 7–18.
8. Sun C.-H. Cournot and Bertrand competition in a model of spatial price discrimination with differentiated products. *The B.E. of Theoretical Economics*. 2014. № 14. pp. 251–272.
9. Мельников С.В. Рівноваги у просторовій дуополії: асиметрія ринків vs. продуктова диференціація. *Розвиток транспорту*. 2022. № 3(14). С. 9–24.
10. Liang W.J., Hwang H., Mai C.C. Spatial discrimination: Bertrand vs. Cournot with asymmetric demands. *Regional Science and Urban Economics*. 2006. № 36. pp. 790–802.
11. Bylka, S., & Komar, J. Cournot-Bertrand mixed oligopolies. In M.W. Los, J. Los and A. Wiczorek (eds), *Warsaw Fall Seminars in Mathematical Economics*, (pp. 22–33). New York : Springer-Verlag, 1975.
12. Tremblay C.H., Tremblay V.J. The Cournot-Bertrand model and the degree of product differentiation. *Economics Letters*. 2011. № 111, pp. 233–235.
13. Wang H., Ma J. Complexity analysis of a Cournot-Bertrand duopoly game model with limited information. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2013. № 3, pp. 1–6.
14. Ma J., Wang H. Complex dynamics analysis for a Cournot-Bertrand mixed game model with delayed bounded rationality. *Abstract and Applied Analysis*. 2013. № 10. pp. 1–11.
15. Naimzada A. K., Tramontana F. Dynamic properties of a Cournot-Bertrand duopoly game with differentiated products. *Economic Modelling*, 2012. № 290. pp. 1436–1439.
16. Dixit A. Comparative statics for oligopoly. *International Economic Review*. 1986. № 27(1), pp. 107–122.

REFERENCES

1. Singh, N., & Vives, X. (1984). Price and quantity competition in a differentiated duopoly. *Rand Journal of Economics*, 15, 546–554.
2. Anderson, S., & Neven, D. (1991). Cournot Competition Yields Spatial Agglomeration. *International Economic Review*, 32(4), 793–808.
3. Hamilton, J., Thisse, J.-F., & Weskamp, A. (1989). Spatial discrimination, Bertrand vs. Cournot in a model of location choice. *Regional Science and Urban Economics*, 19, 87–102.
4. Melnikov, S.V. (2018). Location choice of firms under Stackelberg information asymmetry. *Transport & Logistics*, 18(44), 35–44.
5. Melnikov, S.V. (2019). Cournot Competition Yields Spatial Dispersion. *Transport Development*, 1(4), 57–70.
6. Melnikov, S.V. (2020). Stackelberg-Nash Equilibrium in the Linear City Model. *Automation and Remote Control*, 81(2), 358–365.
7. Melnikov S.V. (2021). Cournot and Bertrand competition under spatial duopoly with asymmetric markets [Konkurentsiiia za Kurno ta Bertranom v umovakh prostorovoi duopolii z asymetrychnymy rynkamy]. *Transport Development*, 3(10), 7–18 [in Ukrainian].
8. Sun, C.-H. (2014). Cournot and Bertrand competition in a model of spatial price discrimination with differentiated products. *The B.E. of Theoretical Economics*, 14, 251–272.
9. Melnikov S.V. (2022). Equilibria in a spatial duopoly: market asymmetry vs. product differentiation [Rivnovahy u prostorovii duopolii: asymetriia rynkiv vs. produktova dyferentsiatsiia]. *Transport Development*, 3(14), 9–24 [in Ukrainian].
10. Liang, W.J., Hwang, H., & Mai, C.C. (2006). Spatial discrimination: Bertrand vs. Cournot with asymmetric demands. *Regional Science and Urban Economics*, 36, 790–802.
11. Bylka, S., & Komar, J. (1975). Cournot-Bertrand mixed oligopolies. In M.W. Los, J. Los and A. Wiczorek (eds), *Warsaw Fall Seminars in Mathematical Economics*, (pp. 22–33). New York: Springer-Verlag.
12. Tremblay, C.H. & Tremblay, V.J. (2011). The Cournot-Bertrand model and the degree of product differentiation. *Economics Letters*, 111, 233–235.
13. Wang, H. & Ma, J. (2013). Complexity analysis of a Cournot-Bertrand duopoly game model with limited information. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 3, 1–6.
14. Ma, J. & Wang, H. (2013). Complex dynamics analysis for a Cournot-Bertrand mixed game model with delayed bounded rationality. *Abstract and Applied Analysis*, 10, 1–11.
15. Naimzada, A. K. & Tramontana, F. (2012). Dynamic properties of a Cournot-Bertrand duopoly game with differentiated products. *Economic Modelling*, 290, 1436–1439.
16. Dixit, A. (1986). Comparative statics for oligopoly. *International Economic Review*, 27(1), 107–122.

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 656.2.073.235:624.014

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2023.3-18.04>

МОДЕЛЮВАННЯ ПОПЕРЕЧНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ КОНТЕЙНЕРА ЗІ СТІНАМИ ІЗ СЕНДВІЧ-ПАНЕЛЕЙ, РОЗМІЩЕНОГО НА ВАГОНІ-ПЛАТФОРМІ

Г.Л. Ватуля¹, А.О. Ловська², Є.С. Краснокутський³, С.В. Дериземля⁴

¹д.т.н., професор, заступник директора з наукової роботи,
Навчально-науковий інститут будівельної та цивільної інженерії
Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова,
Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-3823-7201

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

³заступник директора філії з наукової роботи,
Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного
транспорту АТ «Укрзалізниця», Київ, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-6978-4489

⁴к.т.н., асистент кафедри будівельних конструкцій,
Сумський національний аграрний університет, Суми, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-6556-4454

Анотація

Вступ. Підвищення ефективності експлуатації залізничної галузі зумовлює необхідність впровадження комбінованих систем транспорту. Найбільш пріоритетними серед таких на сьогоднішній день є контейнерні перевезення, що обумовлено мобільністю контейнерів як транспортних засобів. Для утримання конкурентоспроможності контейнерних перевезень важливим є підвищення техніко-економічних та експлуатаційних характеристик контейнерів. Не менш важливим критерієм, спрямованим на підвищення затребуваності використання контейнерів є забезпечення схоронності вантажів, що перевозяться у них. Тому дослідження, присвячені створенню сучасних конструкцій контейнерів, є актуальними.

Мета. Висвітлення результатів моделювання поперечної навантаженості контейнера зі стінами із сендвіч-панелей, розміщеного на вагоні-платформі при його боковій хитавиці.

Результати. З метою зменшення динамічної навантаженості контейнера в експлуатації запропоновано виготовлення його стін із сендвіч-панелей. Для обґрунтування застосування сендвіч-панелей в бокових стінах контейнера проведено математичне моделювання його динамічної навантаженості за умови розміщення на вагоні-платформі при коливаннях бокової хитавиці. Встановлено, що

максимальні прискорення, які діють на контейнер зі стінами із сендвіч-панелей, майже на 5% нижчі за ті, що діють на контейнер типової конструкції. Проведено комп'ютерне моделювання поперечної навантаженості контейнера зі стінами із сендвіч-панелей. Розбіжність між результатами, отриманими математичним та комп'ютерним моделюванням, складає близько 8%. Верифікацію сформованих моделей поперечної навантаженості контейнера здійснено за F-критерієм.

Висновки. Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо проектування сучасних конструкцій транспортних засобів модульного типу та підвищенню ефективності функціонування транспортної галузі.

Ключові слова: контейнер ISO, сендвіч-панель, поперечна навантаженість контейнера, контейнерні перевезення.

MODELING OF THE TRANSVERSAL LOADING OF A CONTAINER WITH SANDWICH PANELS WALLS PLACED ON A PLATFORM CAR

G.L. Vatulia¹, A.O. Lovska², Ye.S. Krasnokutskyi³, S.V. Deryzemlia⁴

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director for Scientific Work,
Educational and Scientific Institute of Construction and Civil Engineering of O.M. Beketov
National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-3823-7201

²Doctor 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

³Deputy Director of the Branch for Scientific Work,
Research and Design and Technological Institute of Railway Transport
of the JSC "Ukrzaliznytsia", Kyiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-6978-4489

⁴Candidate of Technical Science, Assistant of Building Structures Department,
Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-6556-4454

Summary

Introduction. The efficiency improvement of the operation of the railway industry necessitates the combined transport systems implementation. Today, container transportation is the most prioritized which is caused by the mobility of containers as vehicles. To maintain container transportation competitiveness, it is important to improve the technical, economic, and operational characteristics of containers. A valuable criterion aimed at the demand improvement for the use of containers is ensuring the safety of freight transported in them. Therefore, research devoted to modern container development is actual.

Purpose. Elucidation of the results of modeling the lateral load of a container with walls made of sandwich panels, placed on a platform car during its lateral sway.

Results. In order to reduce the dynamic load of the container in operation, it is proposed to make its walls from sandwich panels. To reason for the use of sandwich panels in the side walls of the container, mathematical modeling of its dynamic load was carried out under the condition of placement on a platform car with side rocker oscillations. It was found that the maximum accelerations acting on a container with

sandwich panel walls are almost 5% lower than those acting on a container of typical construction. A computer simulation of the transverse load of a container with sandwich panel walls was carried out. The difference between the results obtained by mathematical and computer modeling is about 8%. Verification of the formed models of the lateral load of the container was carried out according to the F-criterion.

Conclusions. *The conducted research will contribute to the development of recommendations for the design of modern designs of modular vehicles and increase the transport industry efficiency.*

Key words: *ISO container, sandwich panel, transverse container loading, container transportation.*

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Ефективність роботи машинобудівної галузі зумовлює необхідність розробки та введення в експлуатацію сучасних конструкцій транспортних засобів. Досвід розвитку вагонного парку в країнах-учасниках UIC свідчить про стійку тенденцію розвитку контейнерних перевезень. Значний сегмент таких перевезень припадає на залізничний транспорт. Важливо сказати, що, окрім ряду переваг контейнерних перевезень вантажів залізницею, є і суттєві недоліки такого симбіозу. Одним з основних серед таких недоліків є циклічність дії експлуатаційних навантажень на несучу конструкцію контейнерів. Ці навантаження впливають не тільки на контейнер, а й на вантаж, розміщений у ньому. Завдяки тому, що вантаж може мати власний ступінь вільності, конструкція контейнера випробовує додаткову навантаженість. Це сприяє пошкодженню контейнера. Тому важливими є розробка та впровадження рішень, спрямованих на зменшення навантаженості контейнерів в умовах експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання цієї проблеми, і виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Дослідження, присвячені конструктивним вдосконаленням контейнерів, є досить актуальними, що підтверджено великою кількістю публікацій. Наприклад, в роботі [1] авторами запропоновано та обґрунтовано конструкцію контейнера для плодово-овочевої продукції. Усі конструктивні рішення щодо вдосконалення контейнера підтверджені відповідними розрахунками на міцність. Також в роботі наведено аналіз основних розрахункових схем контейнерів. Важливо сказати, що при цьому не запропоновано жодних рішень щодо підвищення міцності стін контейнера як однієї із найбільш вразливих складових конструкції.

Для зниження динамічних навантажень, які діють на транспортні засоби, в експлуатації знайшли використання сендвіч-панелі в їх конструкціях. Наприклад, в роботі [2] проведено обґрунтування використання сендвіч-панелей у якості підлоги напіввагона. Таке рішення сприяє зменшенню вертикальних навантажень, які діють на нього при русі рейковою колією.

Застосування сендвіч-панелей у конструкції кузова вагона також обґрунтовується в публікаціях [3; 4]. Дослідження проводились на прикладі напіввагона. Зазначено, що дане удосконалення може мати місце як при виготовленні, так і при модернізаціях залізничних вагонів. Однак стосовно контейнерів обґрунтування такого удосконалення не проводилося.

В роботі [5] наведено обґрунтування використання сендвіч-панелей у якості складових кузова вагона-хопера. Результати розрахунків показали, що це рішення сприяє зменшенню тари несучої конструкції на 16,36% порівняно з прототипом. Однак питання визначення динамічної навантаженості удосконаленої конструкції вагона в роботі не розглядалося.

В публікації [6] обґрунтовано впровадження сендвіч-панелей в якості торцевих стін контейнера. Встановлено, що з урахуванням запропонованого удосконалення стає можливим знизити динамічні навантаження, які сприймає контейнер на 10% у порівнянні з типовою конструкцією. Отримані результати підтверджено комп'ютерним моделюванням динамічної навантаженості контейнера. Разом з цим визначенню поперечної навантаженості контейнера зі стінами із сендвіч-панелей авторами не досліджувалося.

Огляд літературних джерел [1–6] дозволяє зробити висновок, що питання удосконалень контейнерів з метою зменшення їх динамічної навантаженості в експлуатації є досить актуальними. Разом з цим дослідженню поперечної навантаженості контейнерів зі стінами із сендвіч-панелей досі не приділялося уваги. Така обставина викликає необхідність проведення досліджень в зазначеному напрямку.

Формулювання мети статті, постановка завдання. Висвітлення результатів моделювання поперечної навантаженості контейнера зі стінами із сендвіч-панелей, розміщеного на вагоні-платформі при його боковій хитавиці. Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

1. Провести математичне моделювання поперечної навантаженості контейнера зі стінами із сендвіч-панелей.
2. Провести комп'ютерне моделювання поперечної навантаженості контейнера зі стінами із сендвіч-панелей.
3. Верифікувати сформовані моделі поперечної навантаженості контейнера зі стінами із сендвіч-панелей.

Об'єктом дослідження є контейнер зі стінами із сендвіч-панелей.

Предмет дослідження – динамічна навантаженість контейнера зі стінами із сендвіч-панелей.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Для обґрунтування застосування сендвіч-панелей в бокових стінах контейнера проведено математичне моделювання його динамічної навантаженості за умови розміщення на вагоні-платформі при коливаннях бокової хитавиці. Розрахункову схему контейнера, розміщеного на вагоні-платформі, наведено на рис. 1.

Для визначення динамічної навантаженості контейнера сформовано систему рівнянь, на якій базується математична модель (1).

$$\begin{cases} I_{\text{ВПФ}} \cdot \ddot{q}_1 + c_B \cdot b \cdot (\text{sign}(b \cdot q_1)) = F_k, \\ I_k \cdot \ddot{q}_2 - g(M_k \cdot z^2) \cdot q_2 = F_{\text{ВПФ}} + F_B - c \cdot b^2 \cdot (q_2 - q_3) - \beta \cdot b^2 \cdot (\dot{q}_2 - \dot{q}_3), \\ I_B \cdot \ddot{q}_3 = F_k - c \cdot b^2 \cdot (q_2 - q_3) - \beta \cdot b^2 \cdot (\dot{q}_2 - \dot{q}_3), \end{cases} \quad (1)$$

де $I_{\text{ВПФ}}$ – момент інерції вагона-платформи; c_B – жорсткість пружин ресорного підвищення візка; b – напівширина рами вагона-платформи; F_k – момент сил, що виникає між контейнером та рамою вагона-платформи; I_k – момент інерції

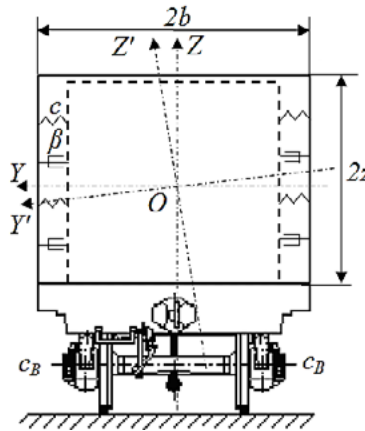


Рис. 1. Розрахункова схема контейнера, розміщеного на вагоні-платформі

контейнера відносно повздовжньої осі; M_k – маса контейнера; z – напіввисота контейнера; $F_{ВПФ}$ – момент сил, що виникає між вагоном-платформою та контейнером; F_B – момент сил, що виникає між контейнером та вантажем; c – жорсткість енергопоглинального матеріалу сендвіч-панелі; β – коефіцієнт в'язкого опору енергопоглинального матеріалу сендвіч-панелі; I_B – момент інерції вантажу; F_k – момент сил, що виникає між вантажем та контейнером.

Розв'язок системи рівнянь (1) здійснено в програмному комплексі MathCad при початкових умовах, рівних нулю [7–9]. При цьому модель зволилася до нормальної форми Коші з послідуочим розв'язком за методом Рунге-Кутта [10–12]. На підставі проведених розрахунків встановлено, що максимальні прискорення, які діють на контейнер складають $1,7 \text{ м/с}^2$ (рис. 2).

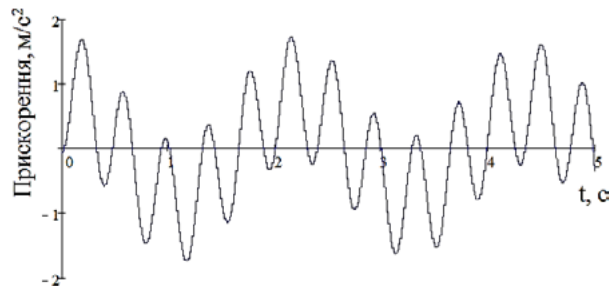


Рис. 2. Прискорення, які діють на контейнер

Отримана величина прискорення майже на 5% нижча за ту, що діє на контейнер типової конструкції. Розрахунок реалізований при значенні коефіцієнту жорсткості енергопоглинального матеріалу сендвіч-панелі $1,5 \text{ кН/м}$ та коефіцієнту в'язкого опору $2,0 \text{ кН} \cdot \text{с/м}$. Дані параметри визначені шляхом послідовного перебору за умови дотримання прискорень в межах допустимих значень.

Для верифікації сформованої математичної моделі здійснено комп'ютерне моделювання поперечної навантаженості контейнера, розміщеного на вагоні-платформі. Розрахунок здійснено за методом скінчених елементів в програмному

комплексі SolidWorks Simulation [13; 14]. Для цього побудовано просторову модель контейнера в програмному комплексі SolidWorks. При її створенні враховано елементи конструкції, що жорстко взаємодіють між собою. Розрахунок здійснено за IV теорією міцності (енергетична теорія). Для урахування пружно-в'язкого зв'язку в сендвіч-панелях, які утворюють бокові стіни, за допомогою опцій програмного комплексу між металевими листами встановлювався зв'язок «пружина – демпфер».

Розрахункова схема контейнера враховує такі навантаження (рис. 3): вертикальне статичне P_e , а також поперечне P_n , яке прикладалося до бокової стіни. Поперечне навантаження враховувало тиск розпору від вантажу (зерно), а також динамічне навантаження. Динамічне навантаження прикладалося з боку нахилу контейнера.

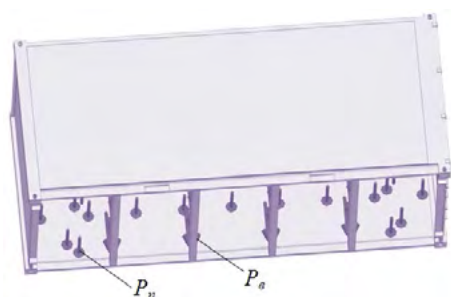


Рис. 3. Розрахункова схема контейнера

Скінчено-елементна модель контейнера утворена 373575 вузлами та 1119509 елементами (тетраедри ізопараметричні). Закріплення моделі відбувалося за фітинги. У якості матеріалу конструкції застосовано сталь 09Г2С. Результати розрахунку наведено на рис. 4.

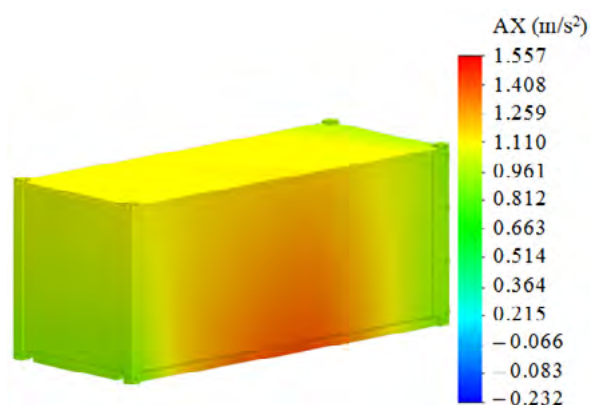


Рис. 4. Поля розподілення прискорень, які діють на контейнер

Максимальні прискорення при цьому виникають у середній частині бокової стіни і складають близько $1,56 \text{ м/с}^2$. В торцевих стінах прискорення дорівнює близько $0,8\text{--}0,9 \text{ м/с}^2$. Розбіжність між результатами, отриманими математичним та комп'ютерним моделюванням, складає близько 8%.

За математичною моделлю (1) та комп'ютерною моделлю навантаженості контейнера (рис. 3) проведено варіаційні розрахунки. У якості варіаційного параметру розглянуто вагу бруто контейнера. На підставі проведених розрахунків отримано дві вибірки (табл. 1). За даними вибірками проведено верифікацію моделей із використанням F-критерію.

Таблиця 1

Прискорення, які діють на контейнер

Вага контейнера, т	Прискорення, м/с ²	
	Математична модель	Комп'ютерна модель
24	1,7	1,55
22	1,85	1,65
20	1,92	1,79
18	2,08	1,86
16	2,13	1,93
14	2,18	2,05
12	2,25	2,17

Результати досліджень показали, що при розрахунковому значенні критерію $F_p = 1,17$ і табличному $F_t = 3,97$ гіпотеза про адекватність не заперечується.

Висновки та перспективи подальшої роботи в цьому напрямі. Проведено математичне моделювання поперечної навантаженості контейнера зі стінами із сендвіч-панелей. Встановлено, що максимальні прискорення, які діють на контейнер, дорівнюють близько $1,7 \text{ м/с}^2$. Отримана величина прискорення майже на 5% нижча за ту, що діє на контейнер типової конструкції.

Проведено комп'ютерне моделювання поперечної навантаженості контейнера зі стінами із сендвіч-панелей. Максимальні прискорення при цьому виникають у середній частині бокової стіни і складають близько $1,56 \text{ м/с}^2$. В торцевих стінах прискорення дорівнює близько $0,8\text{--}0,9 \text{ м/с}^2$. Розбіжність між результатами, отриманими математичним та комп'ютерним моделюванням, складає близько 8%.

Верифіковано сформовані моделі поперечної навантаженості контейнера зі стінами із сендвіч-панелей за F-критерієм. Встановлено, що при розрахунковому значенні критерію $F_p = 1,17$ і табличному $F_t = 3,97$ гіпотеза про адекватність не заперечується.

Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування сучасних конструкцій контейнерів, утриманню конкурентоздатності контейнерних перевезень та підвищенню рентабельності транспортної галузі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Matluba A. Khadjimukhametova, Avaz M. Merganov. Development of the Design and Conditions of Operation of Containers for Transportation of Fruit and Vegetable Products. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2020. Vol. 8. Issue 5. P. 2277–3878.
2. Ватуля Г., Герліці Ю., Ловська А. Дослідження навантаженості кузова напіввагона з підлогою із сендвіч-панелей. *Залізничний транспорт України*. 2023. № 2. С. 33–41.

3. Marek Płaczek, Andrzej Wróbel and Maciej Olesiejuk. Modelling and arrangement of composite panels in modernized freight cars. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 112. 06022. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711206022>.
4. Andrzej Wróbel, Marek Płaczek and Andrzej Buchacz. An Endurance Test of Composite Panels. *Solid State Phenomena*. 2017. Vol. 260. P. 241–248. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.260.241>.
5. Ayman Al-Sukhon, Mostafa S A. El Sayed. Design optimization of hopper cars employing functionally graded honeycomb sandwich panels. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: *Journal of Rail and Rapid Transit*. 2021. Vol. 236, Issue 8. URL: <https://doi.org/10.1177/095440972111049640>.
6. Glib Vatulia, Alyona Lovska, Sergiy Myamlin, Iraida Stanovska, Maryna Holofieieva, Volodymyr Horobets, Volodymyr Nerubatskyi, Yevhen Krasnokutskyi. Revealing the effect of structural components made of sandwich panel on loading the container transported by railroad. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologie*. 2023. Vol. 1/7(121). P. 48–56. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.272316>.
7. Задачин В.М., Конюшенко І.Г. Чисельні методи: навчальний посібник. Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. 180 с.
8. Гой Т.П., Махней О.В. Диференціальні рівняння : навчальний посібник. Івано-Франківськ : Сімик, 2012. 352 с.
9. Дьомін Ю.В., Черняк Г.Ю. Основи динаміки вагонів. Київ : КУЕТТ, 2003. 269 с.
10. Богач І.В., Краковецький О.Ю., Килик Л.В. Чисельні методи розв'язання диференціальних рівнянь засобами MathCad : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2020. 106 с.
11. Соболенко О.В., Петречук Л.М., Іващенко Ю.С. Методи рішення математичних задач у середовищі Mathcad : навчальний посібник з дисципліни «Інформатика і системологія». Дніпро : НМетАУ, 2020. 60 с.
12. Ватуля Г.Л., Ловська А.О., Краснокутський Є.С. Математичне моделювання вертикальної навантаженості контейнера типу хопер, розміщеного на довгобазній конструкції вагона-платформи. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Динаміка і міцність машин. 2022. № 1. С. 34–39.
13. Panchenko S., Gerlici J., Vatulia G. Strength assessment of an improved design of a tank container under operating conditions. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. 2023. Vol. 25, Issue 3, 2023. P. B186–B193.
14. Козяр М.М., Фещук Ю.В., Парфенюк О.В. Комп'ютерна графіка: SolidWorks : навчальний посібник. Херсон : Олді-плюс, 2018. 252 с.

REFERENCES

1. Matluba A. Khadjimukhametova, Avaz M. Merganov. (2020). Development of the Design and Conditions of Operation of Containers for Transportation of Fruit and Vegetable Products. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. Vol. 8. Issue 5. P. 2277–3878.

2. Vatulia G. L., Herlitsi Yu., Lovska A. O. (2023). Doslidzhennia navantazhenosti kuzova napivvahona z pidlohoiu iz sendvich-panelei. *Zaliznychnyi transport Ukrainy*. №2. S. 33–41. [in Ukrainian]
3. Marek Płaczek, Andrzej Wróbel and Maciej Olesiejuk. (2017). Modelling and arrangement of composite panels in modernized freight cars. *MATEC Web of Conferences*. Vol. 112. 06022. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711206022>
4. Andrzej Wróbel, Marek Płaczek and Andrzej Buchacz. (2017). An Endurance Test of Composite Panels. *Solid State Phenomena*. Vol. 260. P. 241–248. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.260.241>
5. Ayman Al-Sukhon, Mostafa S A. El Sayed. (2021). Design optimization of hopper cars employing functionally graded honeycomb sandwich panels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. Vol. 236, Issue 8. <https://doi.org/10.1177/095440972111049640>
6. Glib Vatulia, Alyona Lovska, Sergiy Myamlin, Iraida Stanovska, Maryna Holofieieva, Volodymyr Horobets, Volodymyr Nerubatskyi, Yevhen Krasnokutskyi. (2023). Revealing the effect of structural components made of sandwich panel on loading the container transported by railroad. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologie*. Vol. 1/7(121). P. 48–56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.272316>
7. Zadachyn V. M., Koniushenko I. H. (2014). Chyselni metody: navchalnyi posibnyk. Kharkiv: KhNEU im. S. Kuznetsia. 180 s. [in Ukrainian]
8. Hoi T. P., Makhnei O. V. (2012). Dyferentsialni rivniannia: navchalnyi posibnyk. Ivano-Frankivsk: Simyk. 352 s. [in Ukrainian]
9. Domin, Yu. V., Chernyak, G. Yu. (2003). Osnovi dinamiki vagoniv. Kiyiv : KUETT. 269 s. [in Ukrainian]
10. Bohach I. V., Krakovetskyi O. Yu., Kylyk L. V. (2020). Chyselni metody rozviazannia dyferentsialnykh rivnian zasobamy MathCad: Navchalnyi posibnyk. Vinnytsia: VNTU. 106 s. [in Ukrainian]
11. Sobolenko O. V., Petrechuk L. M., Ivashchenko Yu. S., Yehortseva Ye. Ye. (2020). Metody rishennia matematychnykh zadach u seredovyshchi Mathcad: Navchalnyi posibnyk z dystsypliny “Informatyka i systemolohiia”. Dnipro: NMetAU. 60 s. [in Ukrainian]
12. Vatulia G. L., Lovska A. O., Krasnokutskyi Ye. S. (2022). Matematyчне modeliuвання vertykalnoi navantazhenosti konteineru typu khoper, rozmishchenoho na dovhobaznii konstruktsii vahona-platfomy. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Serii: Dynamika i mitsnist mashyn*. № 1. S. 34 – 39. [in Ukrainian]
13. Panchenko S., Gerlici J., Vatulia G., Lovska A., Rybin A., Kravchenko O. (2023). Strength assessment of an improved design of a tank container under operating conditions. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. Vol. 25, Issue 3. P. B186 – B193.
14. Koziar M. M., Feshchuk Yu. V., Parfeniuk O. V. (2018). Kompiuterna hrafika: SolidWorks: Navchalnyi posibnyk. Kherson: Oldi-plius. 252 s. [in Ukrainian]

МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 007:656.61

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2023.3-18.05>

THE USAGES OF CYBERSECURITY IN MARINE COMMUNICATIONS

Nameer Hashim Qasim¹, Aqeel Mahmood Jawad², Muthana Hameed Majeed³

¹Associated Professor, Cihan University Sulaimaniya Research Center (CUSRC),
Cihan University-Sulaimaniya, Sulaimaniya, Iraq,
ORCID: 0000-0002-7283-0594

²Lecturer, Department of Medical instrumentation,
Al-Rafidain University College, Baghdad, Iraq,
ORCID: 0000-0003-1671-7607

³Assistant Lecturer,
Arabian Gulf Academy for Maritime Studies, Basrah, Iraq,
ORCID: 0009-0002-5035-6913

Summary

The reliability of marine communications is crucial to ensuring the safety and success of maritime activities. As the marine industry becomes more dependent on digital technology and the internet, it must contend with formidable cybersecurity threats. This article surveys the recent intellectual contributions to the burgeoning topic of maritime communication cybersecurity.

This article's major focus is the use of AI and cryptographic techniques to enhance data security. AI will improve marine communication security using algorithms and machine learning, while cryptographic methods guarantee data privacy and authenticity.

This article also highlights the need for risk assessment procedures and certification programs for cybersecurity professionals. Providing established techniques for risk management and improving overall cybersecurity posture, these components are especially important within the Internet of Things (IoT) ecosystem widespread in the marine industry.

In order to improve cybersecurity education at the collegiate level, this paper presents a new conceptual framework. It highlights the need to prepare the next generation of maritime workers to recognize and respond to cybersecurity risks by providing them with the education they need to protect themselves from cybercrime.

New strategies forwarding against cyberattacks at sea are being investigated, including complexity-thinking techniques and open-source intelligence (OSINT). The debate finishes by stressing the need for standardized cybersecurity measures and incorporating lessons from organizational science research in creating a safer marine communication network.

Key words: *Marine communications, cybersecurity challenges, digital technologies, connectivity, emerging cyber threats, artificial intelligence (AI), cryptographic techniques, cybersecurity certification schemes, risk assessment processes, Internet of Things (IoT) ecosystem.*

КІБЕРБЕЗПЕКА В СФЕРІ МОРСЬКОГО СПОЛУЧЕННЯ

Nameer Hashim Qasim¹, Aqeel Mahmood Jawad², Muthana Hameed Majeed³

¹Associated Professor, Cihan University Sulaimaniya Research Center (CUSRC),
Cihan University-Sulaimaniya, Sulaimaniya, Iraq,
ORCID: 0000-0002-7283-0594

²Lecturer, Department of Medical Instrumentation,
Al-Rafidain University College, Baghdad, Iraq,
ORCID: 0000-0003-1671-7607

³Assistant Lecturer,
Arabian Gulf Academy for Maritime Studies, Basrah, Iraq,
ORCID: 0009-0002-5035-6913

Анотація

Надійійність морських комунікацій є критичною для забезпечення безпеки та успішності морського сполучення. Зараз, коли морська промисловість стає все більше залежною від цифрових технологій та інтернету, виникають нові загрози в сфері кібербезпеки. В статті аналізуються останні розробки в сфері кібербезпеки морських комунікацій.

Основний акцент цієї статті спрямований на використання штучного інтелекту та криптографічних методів для підвищення безпеки даних. Штучний інтелект покращить безпеку морських комунікацій за допомогою гнучких алгоритмів та машинного навчання, в той час як криптографічні методи гарантують конфіденційність та автентичність даних.

В статті вказується на необхідність процедур оцінки ризиків та програм сертифікації для кіберзахисників. Надання встановлених методів управління ризиками та покращення загального стану кібербезпеки має особливе значення в екосистемі інтернету речей, яка широко використовується у морській промисловості.

Для покращення кібербезпеки на рівні вищої освіти, ця стаття пропонує нову концептуальну рамку. Вона підкреслює необхідність підготовки наступного покоління морських робітників до виявлення та реагування на кібербезпекові ризики, надаючи їм необхідну освіту для захисту від кіберзлочинності.

В даний час вивчаються нові стратегії боротьби з кібератаками на морі, включаючи техніки складності мислення та використання відкритого джерела інформації (OSINT). Робиться наголос на необхідності стандартизованих заходів з кібербезпеки та включенням уроків з дослідження організаційних наук у створення безпечної морської комунікаційної мережі.

Ключові слова: морські комунікації, виклики кібербезпеки, цифрові технології, зв'язок, нові кіберзагрози, штучний інтелект (AI), криптографічні техніки, програми сертифікації кіберзахисників, процедури оцінки ризиків, екосистема Інтернету речей (IoT).

1. Introduction

The marine sector has rapidly adopted Digital technology and connectivity, leading to enhanced productivity and smoother operations. A downside to the industry's digital revolution is its increased vulnerability to cyberattacks. Cybersecurity solutions that

have been successful in the past may not be up to the task of identifying and mitigating new forms of cyberattacks on maritime communications [1]. This article examines recent developments in the study of cybersecurity for maritime communications and to stress the need for innovative approaches to addressing these pressing new problems.

Cyberattacks can interrupt vital operations, damage sensitive information, and even pose hazards to human safety as the marine sector becomes more networked. Criminals and terrorists want to obtain access to, intercept, and disrupt maritime communication systems for their ends. Phishing scams, malware infections, and sophisticated, targeted APTs are all examples of today's cyber dangers.

Researchers have been looking at novel cybersecurity strategies developed with maritime communications in mind in order to counter these dangers. Artificial intelligence (AI) methods are one focal point. Artificial intelligence (AI) may improve cybersecurity systems' ability to identify and respond to threats, leading to faster identification of abnormalities and more preventative measures against cyberattacks. For instance, machine learning algorithms can examine massive amounts of network traffic data to spot telltale signs of cyberattacks, allowing for instantaneous responses and limiting the damage that may otherwise be done.

Cryptographic methods are also an essential part of maritime communication security. Sensitive information sent over the internet may maintain privacy, integrity, and validity thanks to encryption techniques and digital signatures. Secure and unreadable by outsiders even if intercepted, thanks to strong encryption methods. The evolution of cryptographic algorithms and key management systems has resulted in robust security in marine settings, even in the face of sophisticated threats.

Cybersecurity certification methods are just as important as technology improvements for the safety of naval communication networks. These initiatives provide a standardized approach to risk management and regulatory compliance by establishing standards and recommendations for cybersecurity procedures. By verifying the integrity of security measures, certification procedures provide stakeholders peace of mind and allow for more well-informed choices. Organizations may measure their progress toward a more secure cyber posture by adopting a culture of security fostered through certification systems.

Risk assessment procedures are also crucial in the context of the IoT ecosystem that predominates in the marine sphere. Managing risks has become more important as the number of linked devices and systems aboard ships increases. In order to better comprehend the danger picture, analyze possible repercussions, and prioritize mitigation measures, maritime businesses might benefit from conducting thorough risk assessments. Organizations may increase their cybersecurity defenses and address gaps in their communication infrastructure with frequent risk assessments.

Increasing cybersecurity education and awareness is also essential in the marine sector. To reduce the impact of the human element in cyber events, it is crucial to foster a culture of cybersecurity among marine workers. Educating workers on potential dangers, proper practices, and how to handle an event may be accomplished via intensive training programs. Future workers will be better prepared to identify, avoid, and react to cyber risks if cybersecurity education is required in the university curriculum, especially in disciplines connected to marine operations and technology.

1.1. The aim of the work

The purpose of this article is to survey recent developments in cybersecurity for maritime communications and provide an in-depth examination and evaluation of the state of the art in this area. In this post, we will look at the cybersecurity issues plaguing the marine sector and provide suggestions for coping with new cyberattacks. It also emphasizes the possibilities of cutting-edge technology like AI and cryptography in bolstering maritime communications' cybersecurity. The paper also intends to discuss the value of certification systems, risk assessment methods, and cybersecurity awareness in the academic community. The article also delves into how the marine sector might use open-source information and complexity-thinking techniques to combat cybersecurity threats. In addition, the article stresses the significance of incorporating organizational science research into cybersecurity for maritime communications. The ultimate objective is to provide a complete and instructive resource that aids in the article and improvement of maritime communications' cybersecurity procedures.

1.2. Research Objective

The main topics explored in the article include Cybersecurity issues in maritime communications, the influence of connectivity and the Internet of Things, standard cybersecurity policies, intrusion detection, and incident response, and more are all discussed in depth in this article.

Evaluate how well existing cybersecurity measures are protecting maritime communication networks and suggest ways to make them even more secure.

Analyze the current procedures and tools for detecting and stopping cyber-attacks on marine networks.

Analyze how well-established incident response protocols safeguard maritime communication networks against cyberattacks.

The goal of this study is to assess the effectiveness of current cybersecurity practices in marine communications by analyzing the impact these practices have on mitigating cyber threats and identifying areas for improvement based on measurable improvements in the security posture of marine communication networks over the course of a year.

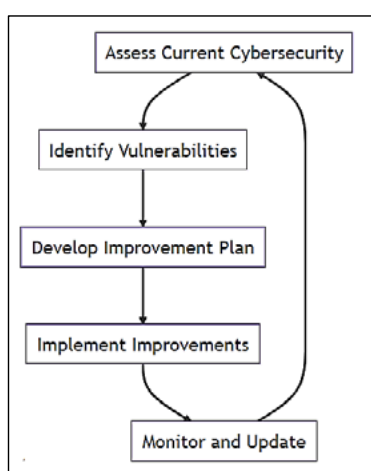


Fig. 1. A Flowchart Guide to Assessing and Enhancing Marine Communications' Cybersecurity

2. Literature Review

A cyber-physical security analysis was performed on port facilities, which included using the Bow Tie Analysis (BTA) technique on a marine asset. [2] Found that BTA is useful for assessing cyber-physical security threats in the marine industry, especially in navigational communication systems.

Insisted that we figure out how well we are doing at spreading cybersecurity education and training across the marine sector. The authors emphasized the growing use of digital tools in the marine sector and the necessity to prioritize cybersecurity measures. The Cyber-MAR Project was suggested to teach and create awareness about cybersecurity in the maritime industry using hyper-realistic modeling and emulation of maritime systems [3].

Through the prism of the maritime industry, [4] investigated the development of norms in cyberspace. To conduct international diplomacy on cyberspace norms, the authors proposed creating a Bureau of Cyberspace Security and Emerging Technology under the United States Department of State. Setting standards in the marine sector was cited as useful to learn [4].

Focused on cyber occurrences and risks in the maritime industry, emphasizing ship safety and navigation. Multiple positioning, navigation, and timing (PNT) solutions were recommended to improve marine cybersecurity [5] since the research highlighted the weaknesses of satellite navigation systems, notably the Global Positioning System (GPS).

Model-based systems engineering ideas were used to construct a technique for determining a system's resilience against cyberattacks. The approach was developed to assess the likelihood and severity of cyber assaults on complex systems like supply chains and their enabling infrastructure. According to the authors, modeling and simulation techniques mostly drive cybersecurity controls and operational choices [6].

Cyber security at sea was regarded as an important ocean policy issue. Security flaws in the shipping industry were highlighted as a major threat to marine ecosystems. Given the proliferation of autonomous ships and efforts by groups like the U.S. Coast Guard and the International Maritime Organization [7], the study's results emphasize the need to strengthen maritime cybersecurity.

Developed a fuzzy evidential reasoning (ER) framework for maritime security assessment based on expert opinion. The framework's purpose was to offer a transparent mechanism for decision-makers to evaluate maritime security policy choices by analyzing subjective risk assessment information from numerous experts. According to the research of [8], a reliable and general technique is required to evaluate maritime security in the face of high levels of uncertainty.

3. Methodology

This article summarizes the results of an academic study of the cybersecurity threats to maritime communications and an assessment of current practices and methods used in this sector. This study's approach included a thorough literature evaluation and analysis of previously conducted and published work on cybersecurity for maritime communications. The approach used to handle the various parts of the research are detailed below.

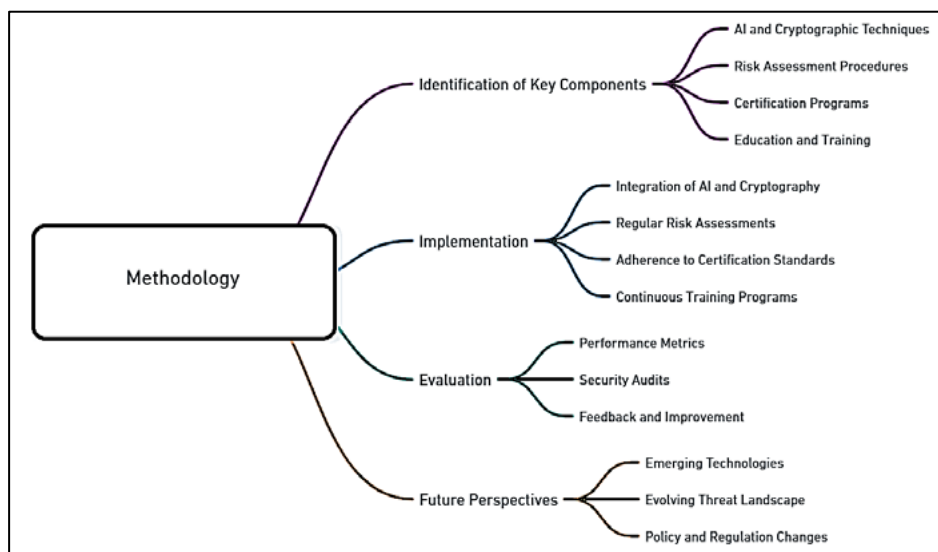


Fig. 2. Methodology for Safeguarding Marine Communications

3.1. Cybersecurity Challenges in Marine Communications

3.1.1. Threat Landscape

The rising use of digital technology has contributed to a shifting danger picture within the maritime industry. An exhaustive literature survey allowed for an in-depth examination of this setting. Using the foundation established by Zeadally et al. (2020) [1] we conducted a study that uncovered the maritime industry's most

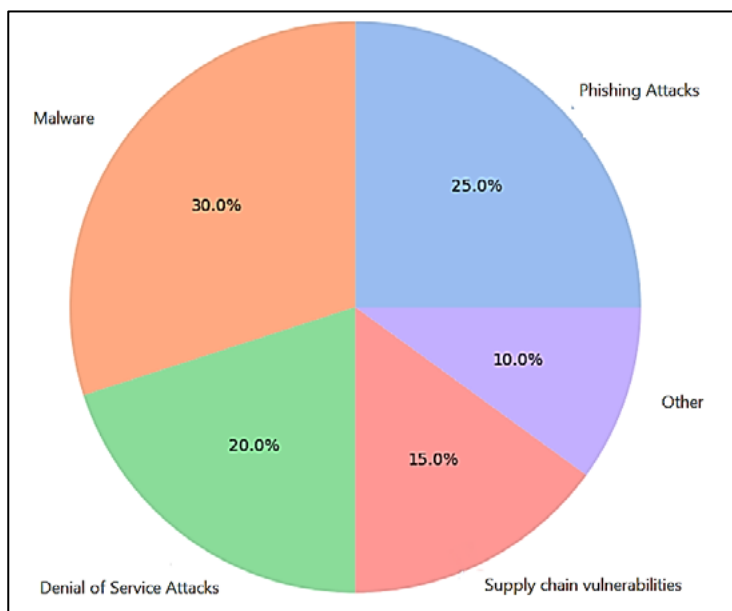


Fig. 3. Cybersecurity Challenges in Marine Communications – A Pie Chart on 2023

pressing cybersecurity issues. With today's assaults being so complex and multi-faceted, the ever-increasing sophistication of cyber threats has become an urgent matter of worry. The fact that many organizations are still using outdated technology that was not built to withstand today's sophisticated cyberattacks was also a major cause for worry. Furthermore, the possibility of state-sponsored assaults added a new layer to the danger picture since they posed a distinct threat scale in terms of resources and purpose. Constantly evaluating the state of this dynamic threat environment is essential for making necessary adjustments to security.

3.1.2. Human Factors

Human factors largely shape the marine communications security paradigm. Our examination of the literature looked at how human error may compromise the security of marine networks, drawing on the work of researchers like [9] and [10] Maritime employees may unintentionally compromise network security despite their expertise due to a lack of cybersecurity training.

Because even accidental mistakes may leave systems susceptible, our article shows that it is essential for employees to grasp cybersecurity problems. Another major idea that surfaced concerned the efficiency of educational initiatives. The overall security of marine communications benefits greatly from well-structured programs that educate personnel on cyber dangers and safe procedures. Thus, human aspects are essential to a holistic strategy for ensuring cyber safety in the marine industry, despite their frequent neglect.

3.1.3. Connectivity and IoT

New cybersecurity risks have emerged due to the widespread use of IoT devices in the marine industry and the subsequent increase in connection. Our article on the dangers of Internet of Things (IoT) enabled marine systems was heavily inspired by the work of [11] and [12].

Cybersecurity risks have escalated dramatically since IoT devices were introduced into the marine area. Because of their interconnectedness, these gadgets are susceptible to attacks from bad actors. As a result, vital systems in the marine sector are vulnerable to exploitation since the proliferation of IoT devices has overtaken the development of solid security measures.

The article also sheds light on the distinct difficulties of ensuring marine connection due to the isolation of activities and the vulnerability to varying climatic conditions. Wireless and satellite networks are becoming more important, significantly complicating security since they may be intercepted or disrupted.

The literature review emphasized the need for the marine industry to address cybersecurity concerns related to connectivity and the Internet of Things. To reduce these dangers and strengthen marine communication networks against attacks, it is essential to implement stringent security standards, perform frequent risk assessments, and fund cutting-edge threat detection and prevention technologies.

3.2. Current Cybersecurity Practices in Marine Communications

3.2.1. Regulatory Frameworks

The extensive study focused on regulatory frameworks to assess the state of cybersecurity in maritime communications. IMO and other organizations rules and suggestions were carefully reviewed as part of an in-depth look at maritime cybersecurity legislation and best practices [13].

The International Maritime Organization (IMO) plays a crucial role in developing cybersecurity norms for the maritime sector as the acknowledged worldwide standard-setting body for the environmental, safety, and security efficiency of global shipping. The current cybersecurity procedures in maritime communications were fully understood by examining the rules supplied by the IMO and other bodies [14].

The results of this article provide important insight into the condition of the existing regulatory frameworks that control cybersecurity in the marine industry. It highlighted the need for action to counteract the proliferation of cyber dangers. The International Marine Organization (IMO) standards are the gold standard for protecting the integrity of marine communication networks.

Organizations working in the marine industry may acquire insights into the required cybersecurity measures and best practices by thoroughly examining these regulatory frameworks. With this information, they can safeguard their communication networks against cyberattacks.

Furthermore, by analyzing these legal frameworks, any holes or opportunities for improvement in present cybersecurity processes may be found and addressed. It lays the groundwork for continued dialogue and cooperation between industry players and regulatory organizations, essential for improving maritime cybersecurity measures.

One of the most important aspects of comprehending the existing condition of cybersecurity practices in maritime communications is the evaluation of regulatory frameworks within the marine industry. Organizations may improve their cybersecurity posture by proactively conforming to established norms and recommendations, bolstering their communication systems' security against new threats.

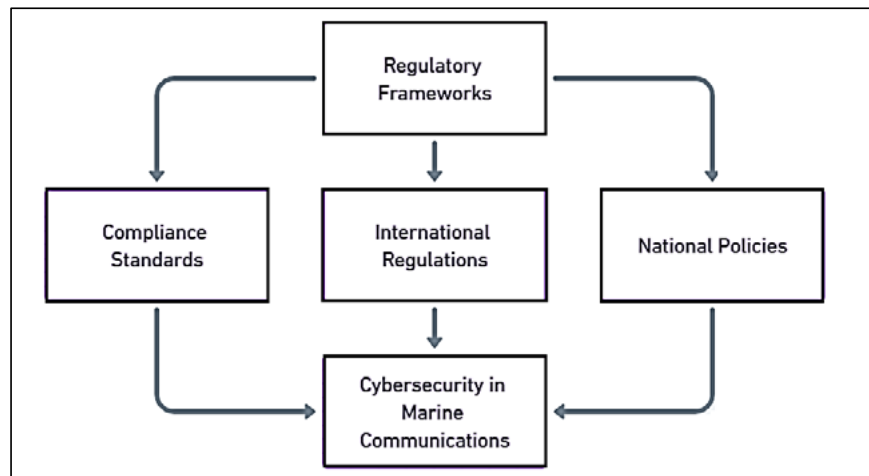


Fig. 4. Mapping the Impact of Frameworks on Cybersecurity in Marine Communications

3.2.2. Authentication and Encryption

Protecting the confidentiality and security of marine communications relies heavily on the efficacy of encryption and authentication methods. A thorough literature review was performed to assess the state of the art in this field concerning the studies of [15] and [16].

Current techniques, protocols, and technologies used in marine communications were analyzed to determine how well they assure safe and reliable data transfer. Protecting private data from being intercepted or seen by the wrong people is a critical function of encryption technology. Cryptographic key management systems and encryption algorithms used in the marine industry were evaluated as part of the evaluation.

The authentication procedures used to confirm the identities of those involved in communication were also investigated. The investigation looked into the authentication techniques used to verify the identities and reliability of marine communication participants. This included methods like digital signatures and certifications that guarantee the authenticity and integrity of data in transit.

We learned about the present status of authentication and encryption procedures in maritime communications from our review of the relevant literature. They illuminate the benefits and drawbacks of current approaches, revealing development opportunities and security holes. Having this information may help improve authentication and encryption systems by filling up any holes they may have.

The evaluation highlighted the need for strong authentication and encryption techniques to protect the confidentiality, authenticity, and integrity of marine communications. The maritime sector may improve its cybersecurity defenses and prevent illegal access, manipulation, and data breaches by deploying strong, dependable encryption algorithms and effective authentication methods.

3.2.3. Intrusion Detection and Incident Response

A thorough literature search was conducted to examine present-day approaches to cybersecurity in maritime communications, focusing on intrusion detection and incident response. We aimed to learn about the maritime industry's current norms and practices by reading research from [17] and [18].

The study uncovered the significance of intrusion detection systems (IDS) in marine cybersecurity. These programs monitor everything going via a network and report anything suspicious. Improved detection capabilities and quicker reaction times in the face of an incursion have prompted the development of cutting-edge IDS technologies, including behavior-based analysis and anomaly detection.

The review stressed the need for well-established processes and practices for handling incidents. The effects of cyberattacks on marine communications may be greatly mitigated if their identification and reaction are expedited. This includes documenting the occurrence, taking steps to control it, conducting a forensic investigation, and restoring the system.

Existing maritime industrial infrastructure was also taken into account in the investigation. It looked at incorporating the best cybersecurity protections into maritime organizations' preexisting networks, software, and hardware. This analysis provided insight into the industry's present level of cybersecurity preparedness and highlighted growth opportunities.

This article adds to our knowledge of the topic through a thorough literature review and analysis of current cybersecurity procedures in maritime communications. It explains how cybersecurity in the marine sector is changing, where the industry is strong and needs improvement, and how current advances might guide future policies and activities. Ultimately, this article is a great reference for anyone involved in improving the security of marine communication networks.

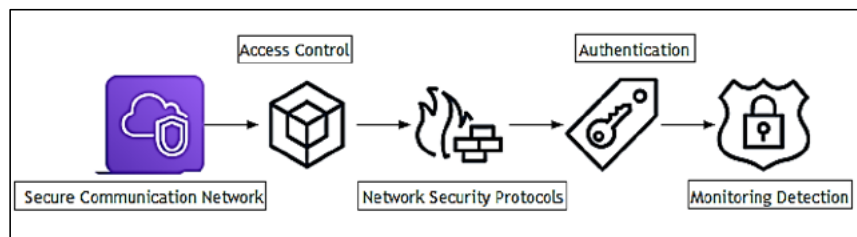


Fig. 5. Visualizing the Process of Establishing and Detecting Malicious Activity in a Secure Communications Network

4. Results and Solutions and Research Trends

Several major discoveries and new tendencies have emerged from studying cybersecurity in maritime communications. The findings presented here emphasize the study's suggested solutions and trends in related research.

4.1. Cybersecurity Awareness and Training

The danger of human error may be reduced, and the maritime industry's overall cybersecurity posture can be strengthened by increasing the emphasis on cybersecurity education and offering comprehensive training programs for marine personnel. With the maritime industry becoming increasingly dependent on digital technology, businesses must develop efficient strategies for promoting a culture of cybersecurity among employees.

Increasing cybersecurity awareness and understanding among naval personnel is crucial to decreasing human-related risks. Employees may be better prepared to deal with cyber threats and incidents if they have access to in-depth training about the risks they face and the best ways to protect themselves and the company. Employees may be informed of the newest cybersecurity dangers, trends, and preventative measures via regularly scheduled training sessions, seminars, and awareness initiatives.

A company's defenses against cyber threats may be strengthened by investing in the education and training of maritime staff. When companies invest in their workers' education and training, they enable those individuals to recognize risks, make educated choices, and take required precautions to keep sensitive information safe. Cybersecurity policies and procedures, secure internet habits, email encryption, password management, social engineering awareness, and incident response protocols are some examples of what may be covered in a comprehensive training program.

In addition, IT and technical personnel are just some of the ones that need cybersecurity training. Everyone on staff, regardless of their position, must be educated on cybersecurity's significance and their part in preserving a safe network. Crew members, operators, maintenance techs, and upper management all fall under this category. Building a solid defense against cyber-attacks requires establishing a cybersecurity culture that incorporates all company members.

Organizations should encourage a preventative mindset on cybersecurity and provide knowledge and training. Methods must be set up so that any possible security breaches may be reported and dealt with quickly. Identifying security flaws and implementing corrective measures is easier when an atmosphere of open dialogue and constant improvement is fostered.

In addition to continuous education and training, it is essential to periodically evaluate and adapt cybersecurity strategies to keep up with the ever-changing nature of online threats. This requires keeping up with cybersecurity through reading relevant industry publications, attending relevant conferences, and working with other cybersecurity professionals. Organizations can keep their cybersecurity posture robust and successfully defend their maritime communication systems by monitoring for and responding to emerging threats.

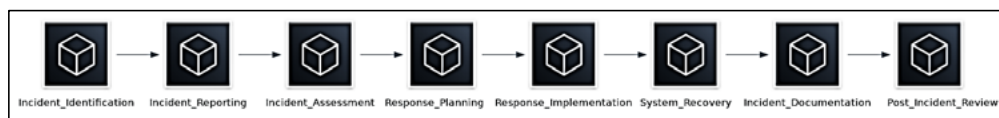


Fig. 6. Incident Response Plan for Cybersecurity in Marine Communications

4.2. Threat Intelligence and Information Sharing

Collaboration and information exchange among marine stakeholders is vital for proactively detecting and responding to cyber threats. The research highlights the need for programs and platforms that allow enterprises in the marine industry to share threat data, attack trends, and preventative actions in real time. Stakeholders can keep ahead of cybercriminals by sharing information and gaining new perspectives.

Several organizations and entities are participating in different elements of marine operations, creating a complex and interrelated ecosystem within which the maritime sector runs. This level of connectivity opens new possibilities for communication and collaboration but also leaves us more susceptible to cyberattacks. Stakeholders in the marine industry must collaborate to counteract the growing sophistication of cyberattacks as digital technologies develop further (Fig. 7).

The need for real-time exchange of threat data and information was highlighted as a crucial conclusion of the research. The rapid change, like cyber threats, makes it imperative that information about these dangers be shared as soon as possible. Stakeholders in the marine industry may improve their defenses by exchanging data on cyber events, attack trends, and preventative measures. This cooperative method guarantees that important information is shared throughout the industry, allowing businesses to take preventative measures to safeguard their networks and systems.

Collaborations like this would only be possible with information-sharing platforms and tools. Information may be safely shared and exchanged on these platforms, allowing for timely dissemination to the appropriate parties. By participating in these projects, businesses may tap into the knowledge of the maritime community, learning about new cybersecurity dangers and how to defend against them.

The article highlights the need to expand the scope of information exchange among marine stakeholders beyond cyber threat intelligence. It includes disseminating attack methodologies, such as those used by cybercriminals. By studying these assault patterns, businesses might locate weak points in their information technology infrastructure. Stakeholders can take the necessary precautions and prepare for incidents if they thoroughly grasp the dangerous environment.

The article also emphasizes the significance of cooperation amongst marine stakeholders in creating mitigation strategies. Cyber resilience may be improved when

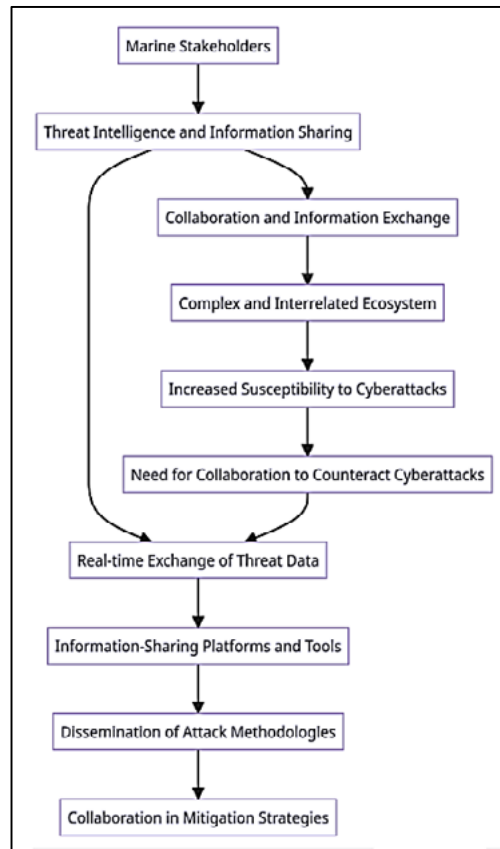


Fig. 7. Collaborative Mitigation Strategies for Cybersecurity in Marine Communications

companies share their best practices and lessons learned with one another. Stakeholders may work together to address cybersecurity issues by participating in collaborative exercises, seminars, and forums to share information and ideas.

4.3. Emerging Technologies

In this post, we look at how blockchain, AI, and ML may be used to strengthen maritime communication systems against cyberattacks. Blockchain technology is a possible option for improving the authenticity and integrity of maritime communications because of its decentralized and tamper-resistant nature, which allows for safe data storage and transmission. AI and ML systems may play a pivotal role in detecting and mitigating cyber risks by analyzing massive volumes of data, seeing trends, and allowing real-time reactions. The study presents case studies and examples to show how these new technologies might be used in the marine industry (Fig. 8).

The findings emphasize the need for further work on cybersecurity, more cooperation among researchers, and better technology developments for maritime communications. The research highlights the importance of cybersecurity in protecting the credibility and availability of maritime networks. The marine sector can successfully confront the changing cyber threat scenario by deploying strong cybersecurity measures and taking a proactive and comprehensive strategy.

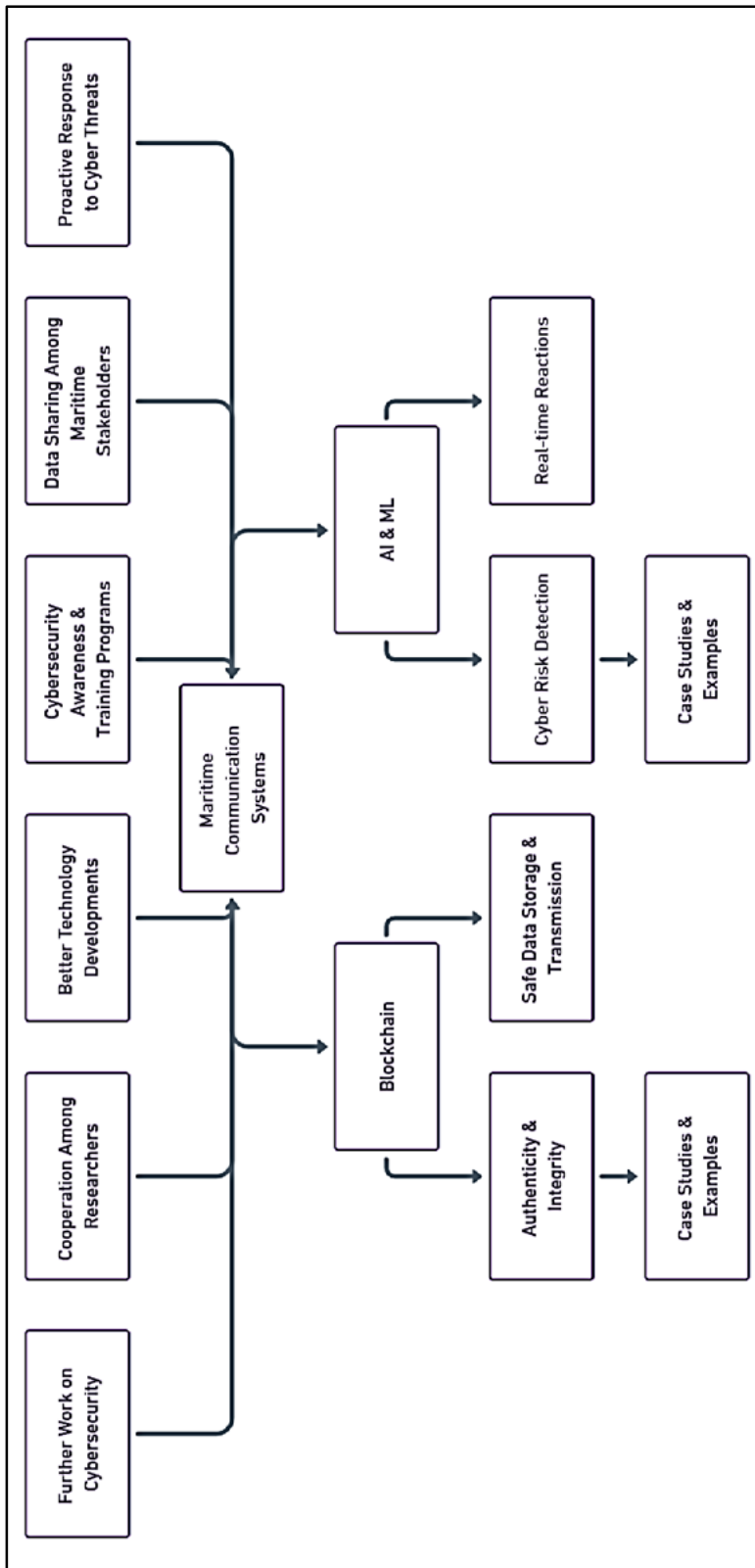


Fig. 8. Leveraging Blockchain, AI, and ML for Fortifying Maritime Communication Systems Against Cyberattacks

In conclusion, the findings of this research highlight the value of cybersecurity awareness and training programs in lessening vulnerabilities caused by humans. The results highlight the need for maritime stakeholders to share data and work together to detect and react to cyber threats proactively. The research also emphasizes the promise of cutting-edge technologies like blockchain, AI, and ML in shoring up maritime communication networks against cyber-attacks. The results of this article add to our knowledge of cybersecurity solutions and research directions in maritime communication, highlighting the need for continuous study, cooperation, and technical progress in the face of a constantly shifting cyber threat scenario. The integrity, dependability, and resilience of marine sector communication systems may be ensured by deploying strong cybersecurity measures in the face of new threats.

5. Discussion

This article makes important contributions to the developing topic of marine communications cybersecurity. This article concurs with [1], in highlighting the growing cybersecurity threats confronting the maritime industry due to the information technology revolution. It adds to what has been discovered by investigating novel approaches, such as AI and cryptography techniques, that may provide answers. The advantages of AI in cybersecurity have been found in studies by [19] and [20] showing the effectiveness of AI in detecting and responding to threats. Our findings show that AI has the potential to improve the safety of marine communications significantly.

The results of who studied the use of sophisticated cryptographic methods in the maritime sector [21], corroborate the significance of cryptographic approaches in guaranteeing data security in maritime communications, as discussed in this article. Their findings further demonstrated the efficacy of encryption in protecting private information from compromise.

In addition, the results of corroborate our study's emphasis on the significance of cybersecurity certification schemes [22], as they discovered that such certificates led to increased stakeholder confidence and regulatory compliance. Their findings support that such certifications contribute to a more secure business culture.

Other research has confirmed our hypothesis that risk assessment methods are important in the IoT ecosystem. Looked at the cybersecurity practices of marine organizations. They found that those routinely conducting risk assessments had fewer breaches and were better equipped to handle prospective attacks. This proves once again the significance of our research and suggestions [23].

The argument stated by who emphasize the necessity for cybersecurity education to prevent human-related cyber hazards, is consistent with our proposal for expanded cybersecurity education in universities and among maritime workers. Since humans are often the weakest link in cybersecurity, their research supports our demand for preventative measures to raise awareness of the issue.

However, this is the only research that has gone as far as ours in proposing open-source intelligence (OSINT) and complexity-thinking methodologies to tackle cybersecurity risks. A major research gap is revealed, opening the door for more studies in this area.

In line with and expanding upon the results of previous recent research, this article provides a detailed review of the present status of cybersecurity in marine communications. It adds new perspectives to the subject using unconventional methods like

OSINT and complexity-thinking methodologies. This article considerably sheds light on the importance of organizational science studies in the context of cybersecurity, and the ensuing debates highlight the necessity for more research in this area.

6. Conclusion

Cybersecurity in the maritime industry is complex, and this article has focused on that topic, emphasizing the vital role that secure marine communications play. In light of the growing reliance on digital technology and connectivity to ensure smooth marine operations, this incident has highlighted the vulnerability of the maritime sector to cyberattacks. It is clear from this discussion that a more proactive, thorough, and nuanced strategy is required to solve the cybersecurity concerns within the marine sector.

The potential of cutting-edge technology AI and cryptographic methods has been extensively explored, particularly in improving marine communication security. Cryptographic technologies guarantee data privacy, integrity, and authenticity, while artificial intelligence may significantly improve the identification and speedy reaction to cyber threats. Data analysis shows that these technologies will protect maritime communications from cyberattacks. This calls for their swift deployment.

The importance of cybersecurity certification programs and risk assessment processes in bolstering the marine sector's cybersecurity has also been highlighted. These methods foster a security-conscious culture while establishing norms and standards for cyber hygiene. By providing confidence in the effectiveness of security measures, certification systems help stakeholders make well-informed choices. On the other hand, risk assessments help businesses understand risks, evaluate impacts, and select countermeasures to strengthen their cybersecurity posture.

The article has highlighted the increasing significance of efficient risk management in light of the IoT ecosystem in the marine sector. The sophistication and scope of cyber threats grow with the number of linked devices and systems on board a ship. Therefore, preventative and efficient management of these cybersecurity threats requires frequent and thorough risk assessments.

The widespread agreement in the area supports an increased focus on cybersecurity education for maritime personnel and in a university curriculum. Human-caused cybersecurity hazards can be drastically reduced if people are more aware of their dangers. In order to improve cybersecurity in the marine industry, it is important to invest in training programs that teach workers about the risks they face, the best ways to prevent and deal with such threats, and the protocols in place to respond when they occur.

As an added weapon against cyber dangers, the article presents novel approaches, including open-source intelligence (OSINT) and complexity-thinking methodologies. These resources provide a novel and promising way forward in the quest to strengthen marine cybersecurity, paving the way for new avenues of investigation.

A key contribution of this work is its emphasis on the need for a multidisciplinary approach to maritime cybersecurity, which draws on organizational science studies' findings. This all-encompassing method enables a deeper comprehension of the issue at hand and encourages the creation of effective solutions that account for every part of marine operations.

Because of the complexity and fluidity of the marine cybersecurity scene, ongoing study, cooperation, and technical development are required to stay up with emerging

threats. Using strong cybersecurity measures may ensure the integrity, dependability, and resilience of marine communications, the adoption of new tactics, and cultivating a culture of security and awareness. As a result, this article may be used as a reference by academics and professionals in the field, ensuring a more secure and safe marine future.

REFERENCES

1. Zeadally, S., et al., *Harnessing Artificial Intelligence Capabilities to Improve Cybersecurity*. Ieee Access, 2020.
2. Progoulakis, I., et al., *Cyber-Physical Security for Ports Infrastructure*. The International Maritime Transport and Logistic Journal, 2022.
3. Canepa, M., et al., *Assessing the Effectiveness of Cybersecurity Training and Raising Awareness Within the Maritime Domain*. 2021.
4. Howard, T.D. and J.d.A.d. Cruz, *Like the Sea, So Cyberspace: A Brief Exploration of Establishing Norms Through a Maritime Lens*. Journal of Advanced Military Studies, 2022.
5. Androjna, A., et al., *Assessing Cyber Challenges of Maritime Navigation*. Journal of Marine Science and Engineering, 2020.
6. Fowler, S.J., K.A. Joiner, and E. Sitnikova, *Assessing Cyber-Worthiness of Complex System Capabilities Using MBSE: A New Rigorous Engineering Methodology*. 2021.
7. McGillivray, P., *Why Maritime Cybersecurity Is an Ocean Policy Priority and How It Can Be Addressed*. Marine Technology Society Journal, 2018.
8. Yang, Z., et al., *Use of Fuzzy Evidential Reasoning in Maritime Security Assessment*. Risk Analysis, 2009.
9. Matheu, S.N., et al., *A Survey of Cybersecurity Certification for the Internet of Things*. Acm Computing Surveys, 2020.
10. Khader, M., M. Karam, and H. Fares, *Cybersecurity Awareness Framework for Academia*. Information, 2021.
11. Ellefsen, A.L., et al., *A Comprehensive Survey of Prognostics and Health Management Based on Deep Learning for Autonomous Ships*. Ieee Transactions on Reliability, 2019.
12. Mullet, V., P. Sondi, and E. Ramat, *A Review of Cybersecurity Guidelines for Manufacturing Factories in Industry 4.0*. Ieee Access, 2021.
13. IMO, *Guidelines on maritime cyber risk management (MSC-FAL.1/Circ.3)*. International Maritime Organization. 2020.
14. Hopcraft, R. and K.M. Martin, *Effective maritime cybersecurity regulation – the case for a cyber code*. Journal of the Indian Ocean Region, 2018. **14**(3): p. 354-366.
15. Adriaensen, A., W. Decré, and L. Pintelon, *Can Complexity-Thinking Methods Contribute to Improving Occupational Safety in Industry 4.0? A Review of Safety Analysis Methods and Their Concepts*. Safety, 2019.
16. Kim, N.-H. and S. Lee, *Cybersecurity Breach and Crisis Response: An Analysis of Organizations' Official Statements in the United States and South Korea*. International Journal of Business Communication, 2018.
17. Dhirani, L.L., E. Armstrong, and T. Newe, *Industrial IoT, Cyber Threats, and Standards Landscape: Evaluation and Roadmap*. Sensors, 2021.

18. Dalal, R.S., et al., *Organizational Science and Cybersecurity: Abundant Opportunities for Research at the Interface*. Journal of Business and Psychology, 2021.
19. Suryotrisongko, H. and Y. Musashi. *Review of Cybersecurity Research Topics, Taxonomy and Challenges: Interdisciplinary Perspective*. in *2019 IEEE 12th Conference on Service-Oriented Computing and Applications (SOCA)*. 2019.
20. McGillivray, P., *Why Maritime Cybersecurity Is an Ocean Policy Priority and How It Can Be Addressed* Marine Technology Society Journal, 2018.
21. Stevens, C., *Assembling cybersecurity: The politics and materiality of technical malware reports and the case of Stuxnet*. Contemporary Security Policy, 2020. 41(1): p. 129-152.
22. Malatji, M., S. Von Solms, and A. Marnewick, *Socio-technical systems cybersecurity framework*. Information & Computer Security, 2019. 27(2): p. 233-272.
23. Pastor-Galindo, J., et al., *The Not Yet Exploited Goldmine of OSINT: Opportunities, Open Challenges and Future Trends*. Ieee Access, 2020.

**ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ
У РАЗІ ВІДНОВЛЕННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ
СУДНОВИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ**

М.С. Агєєв¹, С.М. Устїнцев²

¹д.т.н., професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок,
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-5691-8986

²аспірант кафедри експлуатації суднових енергетичних установок,
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-4352-9479

Анотація

Вступ. Одним з перспективних напрямків у вирішенні проблеми підвищення довговічності деталей суднових машин та механізмів, схильних до інтенсивного зношування в процесі експлуатації, є газотермічне і, зокрема, газополум'яне наплення (ГПН) покриттів в процесі відновлювального ремонту. Ефективність процесу ГПН та властивості покриттів значною мірою обумовлені характером процесу руху та нагрівання частинок порошку в газовому струмені. Керуючи швидкістю та температурою частинок шляхом зміни робочого режиму розпилювальних пристроїв, можна наносити покриття з потрібними властивостями. **Мета** статті полягає у встановленні та дослідженні технологічних факторів, що впливають на формування газополум'яного покриття при відновленні та зміцненні деталей суднових машин та механізмів. **Результати.** Проведені дослідження на етапі формування газополум'яного покриття дозволили встановити основні технологічні параметри, що суттєво впливають на якість протікання процесу та дослідити багатофазну систему фізико-хімічної взаємодії параметрів формування покриття.

Висновки. Визначені основні технологічні параметрами, що впливають на формування газополум'яного покриття (швидкість польоту напилених частинок, дистанція наплення, швидкість руху газів, розповсюдження фронту полум'я тощо). Досліджено взаємозв'язок між динамічними та теплофізичними параметрами формування процесу. З аналізу експериментальних досліджень отримано регресійне рівняння визначення максимальних значень швидкості польоту частинок розміром 40...63 мкм. Для визначення оптимальної дистанції наплення експериментальним шляхом встановлено розподіл температур перерізу, довжини факела полум'я і температуру частинок.

Ключові слова: деталі суднових машин та механізмів, відновлювальний ремонт, технологічні параметри, довговічність, газополум'яне покриття, міцність зчеплення, горюча суміш.

FEATURES OF THE FORMATION OF GAS THERMAL COATINGS
IN THE RESTORATION OF THE WORKING SURFACES
OF SHIP EQUIPMENT PARTS

M.S. Ahieiev¹, S.M. Ustintsev²

¹Doctor of Engineering Sciences, Professor at the Department of Operation
of Ship Power Plants,

Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-5691-8986

²Graduate Student at the Department of Operation of Ship Power Plants,

Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-4352-9479

Summary

Introduction. One of the promising directions in solving the problem of increasing the durability of parts of ship machines and mechanisms, prone to intensive wear and tear during operation, is gas-thermal and, in particular, gas-flame spraying (GFS) of coatings in the process of restorative repair. The effectiveness of the GFS process and the properties of coatings are largely determined by the nature of the process of movement and heating of powder particles in the gas jet. By controlling the speed and temperature of the particles by changing the operating mode of the spraying devices, it is possible to apply coatings with the desired properties. **The purpose** of the article is to establish and study the technological factors affecting the formation of gas-flame coating during the restoration and strengthening of parts of ship machines and mechanisms. **The results.** The conducted research at the stage of gas-flame coating formation made it possible to establish the main technological parameters that significantly affect the quality of the process and to investigate the multiphase system of physical and chemical interaction of coating formation parameters.

Conclusions. The main technological parameters affecting the formation of the gas-flame coating (the speed of the sprayed particles, the spraying distance, the speed of gas movement, the spread of the flame front, etc.) are determined. The relationship between the dynamic and thermophysical parameters of the formation process was studied. From the analysis of experimental studies, a regression equation was obtained for determining the maximum values of the flight speed of particles with a size of 40...63 microns. To determine the optimal spraying distance, the temperature distribution of the section, the length of the flame torch and the temperature of the particles were determined experimentally.

Keywords: details of ship machines and mechanisms, restorative repair, technological parameters, durability, gas flame coating, adhesion strength, combustible mixture.

Вступ. Використання газотермічних покриттів для відновлення та зміцнення робочих поверхонь деталей суднових технічних засобів вносить цілий ряд складнощів і має ряд невизначених факторів при прогнозуванні їх властивостей.

Термін служби відновлених деталей визначається якістю ГПН – покриттів, на які істотно впливають цілий ряд параметрів технологічного процесу ГПН: режим напилання (величина струму, тиск і витрата розпилювального газу, дистанція напилання, швидкість переміщення ГПН – апарату); діаметр, хімічний склад

і швидкість подачі порошку; спосіб обробки поверхонь, відновлених ГПН [1]. Вищевказані технологічні параметри визначають чинники, які впливають на кінетику і формування структури відновлених поверхонь деталей суднових технічних засобів [2; 3]. До них відносяться: параметри газотермічного потоку (діаметр, швидкість і температура газу і частинок розпилюваного матеріалу ГПН-покриттів, ступінь їх окислення); склад і властивості несучої середовища і матеріалу покриттів; шорсткість і температура відновлюваної поверхні.

Постановка проблеми. З метою підвищення фізико-механічних характеристик відновлюваних поверхонь деталей суднових технічних засобів, що в першу чергу залежить від формування структури ГПН – покриття, в ході дослідження потрібно встановити вплив динамічних та теплофізичних параметрів газопорошкових потоків з метою визначення раціональної дистанції напилення різних порошкових матеріалів. Враховуючи, що основний вплив на щільність покриттів і міцність зчеплення з відновлюваною поверхнею надає ступінь термічної активації матеріалу, що напильється, тому бажано, щоб контакт з поверхнею деталі відбувався в точці максимального нагрівання частинок. Для визначення раціональної дистанції напилення необхідно знати розподіл температур перерізу, довжини факела полум'я і температуру частинок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз інформаційних джерел [4–6] показав, що в усіх процесах ГПН дріт або порошок прискорюється, нагрівається, плавиться або пластифікується, випаровується, утворюючи краплі або пластифіковані частинки, які вступають у хімічну взаємодію з нагрітим газом і навколишнім середовищем і при ударній взаємодії з поверхнею, що обробляється, надзвичайно швидко кристалізуються і охолоджуються, формуючи покриття.

Вміст газів у покритті залежить від температури процесу, наявності легуючих елементів у металі та тиску газу. На будову та властивості покриттів впливають швидкість польоту та температура частинок, час перебування їх у хімічно активному середовищі та її склад [7].

Якщо збільшити швидкість напилення, то підвищиться запас кінетичної енергії частинок, що напильються, яка витрачається на їх деформування і закріплення. Чим менший час окислення частинок, тим менша товщина оксидної плівки. Все це в результаті знижує пористість покриттів і значно підвищує їх фізико-механічні та експлуатаційні властивості [8].

Якість покриттів залежить від багатьох різних факторів: конструктивних особливостей розпилювача (плазмотрон, газовий пальник тощо.); типу та обсягу витрати застосовуваних газів; потужності джерела живлення; фізико-хімічних та фізико-механічних властивостей порошоків та флюсів; величини гранул напилуваного матеріалу та значень швидкості його руху; величини дистанції від розпилювача до поверхні деталі, що відновлюється; хімічний склад газів захисної оболонки; методів забезпечення чистоти поверхні, що напильється; системи організації відведення теплоти із зони напилення в період створення покриття, що наноситься, тощо. Тому дослідники вважають, що вивчення особливостей формування ГПН-покриттів є основним напрямком підвищення їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей.

Формулювання цілей статті. Мета статті полягає в дослідженні взаємозв'язку динамічних та теплофізичних параметрів, що впливають на формування

ГПН-покриття при відновленні та зміцненні деталей судових машин та механізмів в процесі ремонту.

Виклад основного матеріалу. Швидкість руху газів у факелі обумовлена швидкістю поширення фронту полум'я та кількістю виділеної теплової енергії а ході реакції «горючий газ – окислювач». Внаслідок того, що швидкість надходження горючої суміші в зону горіння та швидкість поширення фронту полум'я значно відрізняється за величиною, спостерігається пульсація газопорошкового потоку.

Полум'я поширюється зі швидкістю, що перевищує швидкість газів величину швидкості горіння. Деякий обсяг у зоні ядра згоряє швидше, ніж він знову заповнюється черговою порцією суміші, і таким чином, факел полум'я термічних розпилювачів складається з окремих спалахів, що чергуються. Частота цих пульсацій в ядрі полум'я коливається в межах 0,8...1,4 кГц та факелу 0,1...0,15 кГц для ацетилен-кисневої суміші та відповідно 0,6...1,1; 0,095...0,1 кГц для пропан-бутан-кисневої суміші.

Характер горіння суміші та швидкість руху газів у факелі та ядрі полум'я термічного розпилювального пістолета залежать від співвідношення об'ємів окислювач/горючий газ (β). При $\beta_{C_2H_2} = 1,1$ спостерігається стійке горіння, ядро полум'я виражене нечітко, швидкість в факелі на дистанції до 40 мм не перевищує 40 м/с, частота пульсацій полум'я у ядрі 250...300 Гц, у факелі – до 80 Гц (рис. 1). Подальше збільшення C_2H_2 до 2 призводить до збільшення швидкості газів у факелі до 80 м/с і в ядрі до 180 м/с, але при цьому спостерігається зрив полум'я. Найбільш оптимальним є співвідношення $C_2H_2 = 1,9$.

Для суміші $O_2 + C_3H_8 + C_4H_{10}$ збільшення швидкості руху газів у полум'ї зі зростанням значень $\beta_{C_3H_8}$ відбувається з меншою інтенсивністю. Максимальна швидкість у факелі зафіксована на дистанції 30...40 мм при $\beta_{C_3H_8} = 4,2$ і становить 70 м/с, у ядрі – 140 м/с.

Швидкість газів у факелі змінюється відповідно до закону затопленого струменя [9] і на відстані 250...300 мм від сопла термічного розпилювального пістолета склала 40 м/с в ацетилен-кисневому полум'ї та 36 м/с у пропан-бутан-кисневому полум'ї (рис. 2), що порівняно зі значеннями швидкостей плазмового струменя на тих же дистанціях для плазмотронів малої потужності.

Для охолодження соплового наконечника розпилювача, зменшення тепловіддачі в атмосферу та підвищення швидкості полум'я застосовується обдув стисненим повітрям.

Встановлено, що обдув (у досліджуваних діапазонах) істотно не впливає на швидкість газів в ядрі полум'я. При збільшенні витрати повітря, що обдуває, до 3×10^{-4} м³/с швидкість у факелі зростає на 20 ... 25% для досліджуваних газових сумішей, потім практично не змінюється (рис. 3).

Аналіз результатів експериментальних досліджень швидкостей руху частинок в полум'ї показав, що зі зростанням швидкостей газового потоку збільшується і швидкість частинок, причому це збільшення в пропан-бутан-кисневому полум'ї відбувається дещо інтенсивніше, ніж в ацетилен-кисневому (рис. 4), що обумовлено більшою щільністю першого.

Для дослідження залежності швидкості частинок від питомої маси матеріалу, що напилується, були обрані порошки сплаву, що самофлюсується ПГ-12Н-01,

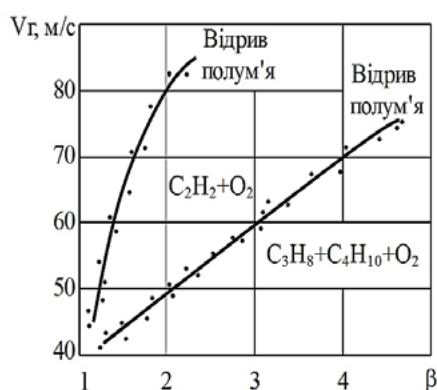


Рис. 1. Вплив співвідношення окислювач /робочий газ (β) на швидкість руху газів у факелі полум'я термічного розпилювача

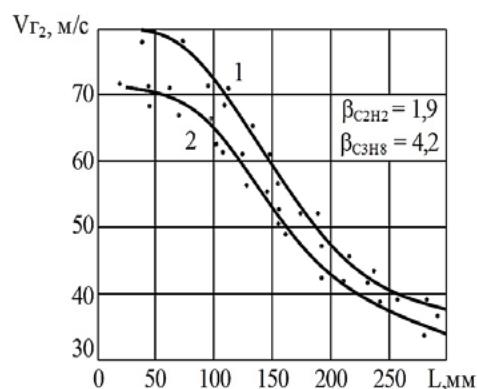


Рис. 2. Зміна швидкості руху газів за довжиною факела ацетилен-кисневого (1) та пропан-бутан-кисневого (2) полум'я

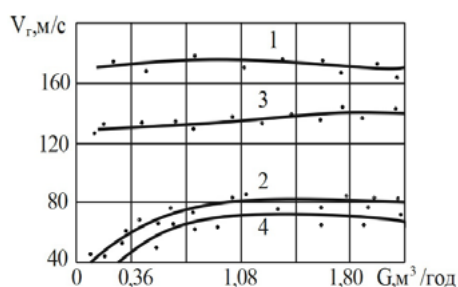


Рис. 3. Вплив витрати обдувального газу (повітря) на швидкість газів у ядрі (1, 3) та факелі (2, 4) полум'я ацетилен-кисень (1, 2) та пропан-бутан-кисень (3, 4)

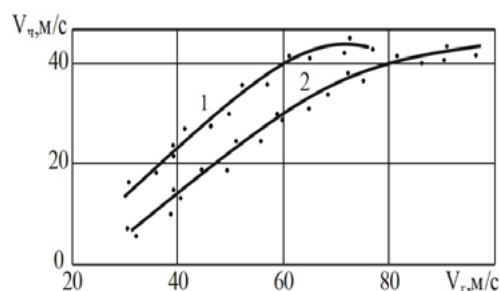


Рис. 4. Залежність швидкості польоту частинок сплаву ПГ-12Н-01 від швидкості руху газів у факелі пропан-бутан-кисневого (1) та ацетилен-кисневого (2) полум'я

бронзи БрОФ10-1, з розміром частинок 50...63 мкм. Витрати газів, м³/год: пропан-бутан – 0,9; кисень – 3,5; стиснене повітря – 0,5. Продуктивність напилення по порошку ПГ-12Н-01 становила 10 кг/год.

Зі збільшенням питомої маси матеріалу порошку зменшується прискорення та швидкість польоту частинок, підвищується відстань від соплового наконечника до точки, в якій частинки мають максимальну швидкість (рис. 5). Аналогічні результати отримані на ацетилен-кисневій суміші, причому швидкість польоту частинок на 15 ... 20% вище, ніж у пропан-бутан-кисневому полум'ї.

Припинення обдування струменя стисненим повітрям знижує величину максимальної швидкості частинок сплаву ПГ-12Н-01 – до 30 м/с.

Частки порошку, що напилюються, в потоці газу набувають прискорення під дією сили в напрямку вектору відносної швидкості газ-частка. Далі за рахунок зниження швидкості газів по довжині полум'я знижується відносна швидкість, і на відстані 75 ... 2000 мм для досліджуваних матеріалів прискорення дорівнює нулю.

Оцінку сили, що діє на сферичну частинку, можна зробити, використовуючи вираз, запропонований в роботі [10]:

$$F_{\text{ч}} = \frac{C_d \rho_r V_{\text{ч}}^2 d_0^2}{8}, \quad (1)$$

де d_0 – діаметр частинки, мм;

ρ_r – густина газу, кг/м³;

$V_{\text{ч}}$ – швидкість частки, м/с;

C_d – коефіцієнт аеродинамічного опору, що визначається у разі $0,15 < R_e < 500$ з рівняння:

$$C_d = \frac{23,707}{R_e} \left(1 + 0,165 R_e^{\frac{2}{3}} - 0,05 R_e^{0,1} \right). \quad (2)$$

З (1) і (2) отримаємо вираз визначення прискорення частки:

$$a_{\text{ч}} = \frac{3 \rho_r V_{\text{ч}}^2}{4 \rho_{\text{ч}} d_0 R_e} \times 23,707 \times \left(1 + 0,165 R_e^{\frac{2}{3}} - 0,05 R_e^{0,1} \right), \quad (3)$$

де $\rho_{\text{ч}}$ – щільність матеріалу частки, кг/м³.

Використовуючи вираз (3) і приймаючи $R_e = 50 \dots 100$, було отримано значення прискорення $a_{\text{ч}} = (3,9 \dots 6,5) \times 10^3$ м/с², що відповідає значенням $a_{\text{ч}}$, отриманим під час експерименту (рис. 5) і рівним $\sim 5 \times 10^3$ м/с².

Оцінка впливу гранулометричного складу на швидкість польоту частинок у факелі здійснювалася з використанням порошоків сплаву ПГ-12Н-01 та бронзи БрОФ10-1, розділених по фракціях за допомогою приладу ситового аналізу. Встановлено, що збільшення розміру частинок бронзи від 50 до 160 мкм знижує максимальне значення швидкості польоту з 32 до 24 м/с, частинок сплаву ПГ-12Н-01 – з 40 до 27 м/с (рис. 6).

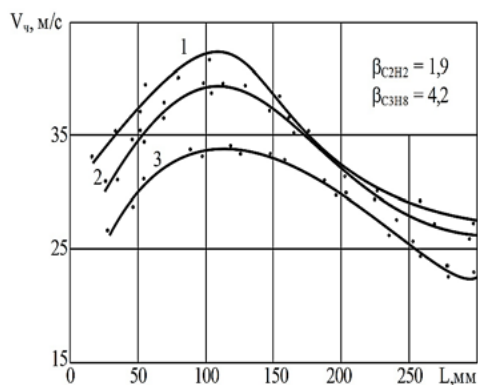


Рис. 5. Зміна швидкості польоту частинок по довжині факела пропан-бутан-кисневого 1,2 та ацетилен-кисневого 3 полум'я: 1 – сплав ПГ-12Н-01; 2, 3 – бронза БрОФ10-1

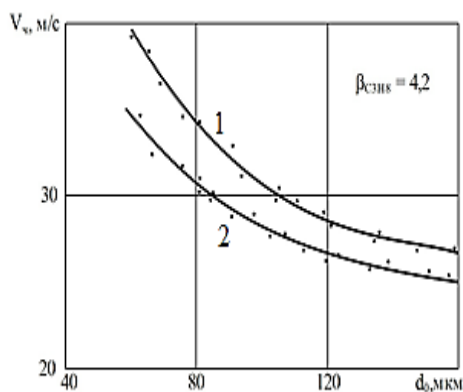


Рис. 6. Залежність максимальної швидкості польоту частинок порошоків від їх розміру: 1 – сплав ПГ-12Н-01; 2 – бронза БрОФ10-1

При цьому максимум швидкості зміщується у бік великих дистанцій (рис. 7). З аналізу експериментальних досліджень отримано регресійне рівняння

визначення максимальних значень швидкості польоту частинок розміром 40...63 мкм:

$$A_u = V_r - A \times \rho_u^\alpha,$$

де V_r – максимальна швидкість газів у факелі полум'я, м×с⁻¹;

$$A = 2,206 \times 10^{-2} \text{ м}^{1,948} \text{ кг}^{-0,316} \text{ с}^{-1};$$

$$\alpha = 0,316.$$

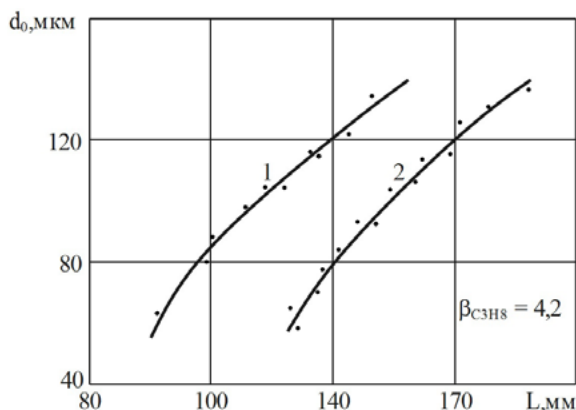


Рис. 7. Вплив розміру частинок напилюваного матеріалу на дистанцію, що відповідає максимальній швидкості польоту частинок сплаву ПГ-12Н-01 (1) та бронзи БрОФ10-1 (2)

Таким чином, максимальні швидкості руху мають дрібніші частинки порошків (40...63 мкм), і їх краще використовувати при напиленні на внутрішні поверхні порожнистих деталей, оскільки в даному випадку дистанція напилення обмежена розмірами виробу.

Висновки. Отримані залежності і результати експериментальних досліджень ЕДН були спрямовані на вирішення завдання управління параметрами газопорошкового потоку: швидкістю газу і напилюваних частинок, гранулометричним складом частинок, властивостями частинок і несучого середовища з метою отримання високих фізико-механічних і експлуатаційних властивостей відновлюваних поверхонь і збільшення терміну служби деталей суднових технічних засобів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ageev M.S., Chernovol M.I. Smirnova T.V. Study of the spraying process and the influence of its factors on the properties of electric arc spraying coatings. Modern questions production and repair in industry and in transport: materials of the 20th International Scientific and Technical Seminar (March 23–29, 2020, Tbilisi, Georgia). Kyiv, 2020. P. 201–205.
2. Агеев М.С., Білоцерківський М.А., Лопата В.М. Використання структурних аномалій в сталевих газотермічних покриттях при підвищенні зносостійкості засобів транспорту. *Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету»*. Технічні науки. 2020. № 4. Том 1(287). С. 257–262. doi:10.31891/2307–5732.

3. Агеев М.С., Головащук М.В. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей засобів транспорту шляхом керування факторами процесу електродугового напилення багатофункціональних покриттів *Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету». Технічні науки*. 2019 № 3(273). С. 240–248. doi: 10.31891/2307–5732.
4. Ahieiev, M., Gritsuk, I., Litikova, A. 2021. Application of combined electric arc coatings for parts and units of vehicles recovery in Repair Technologies. SAE Technical Paper Series. doi:10.4271/2021-01-5100.
5. Ageev M., Dovzhuk S., Nikolaychuk V. The Influence of Design Parameters for Electric arc Equipment on the Factors of Spray Process and Properties of Coatings. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2019. Col.1(32). P. 114–122. DOI: <https://doi.org/10.32515/2664-262X>.
6. R. Unger, V. Belaschenko, W. Kratochvil A new arc spray system to spray high density, low oxides coatings. Thermal spray: Proceeding of the 15th International conference. Edited by Coddet. Nice: 1998. P. 1989–1995.
7. Лопата Л.А. Дослідження відновлення автомобільних деталей типу «вал» електродуговою металізацією. «Констр, и технология производства с/х машин» : Збірн. наук. праць. Кіровоград, 2005. Вип. № 35. С. 409–416.
8. Tomie Michio, Abf Nobuyuki, Improvement of sprayed coatings with ultra high voltage EB melting. Trans. JWRI. 1992. 21, № 2. С. 229–300.
9. Агеев М.С., Рудковський А.В., Грищенко О.П. Відновлення деталей засобів транспорту комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів. *Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету». Технічні науки*. 2020. № 3(285). С. 268–277. DOI 10.31891/2307–5732.
10. Lopata L., Smirnova T. Of combined electric arc coatings. *International Scientific Journal Problems of Tribology*. 2019. Vol. 24, № 3/93. P. 51–61. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-93-3-51-61>.

REFERENCES

1. Ageev M.S., Chernovol M.I. Smirnova T.V. (2020). Study of the spraying process and the influence of its factors on the properties of electric arc spraying coatings. Modern questions production and repair in industry and in transport: materials of the 20th International Scientific and Technical Seminar (March 23–29, 2020, Tbilisi, Georgia). Kyiv : 201–205.
2. Ageev M.S., Bilotserkivskyi M.A., Lopata V.M., Vigilyanska N.V. (2020) The use of structural anomalies in steel gas-thermal coatings to increase the wear resistance of vehicles [Vykorystannya strukturnykh anomalii v stalevykh hazotermichnykh pokryttyakh pry pidvyshchenni znosostiykosti zasobiv transportu]. Scientific journal "Bulletin of Khmelnytskyi National University". Technical sciences. No. 4. Volume 1 (287), 257–262. doi:10.31891/2307–5732.
3. Ageev M.S., Golovashchuk M.V. (2019) Improving the operational properties of parts of means of transport by controlling the factors

- of the process of electric arc spraying of multifunctional coatings [Pidvyshchennya ekspluatatsiynykh vlastyvostry detaley zasobiv transportu shlyakhom keruvannya faktoramy protsesu elektroduhovoho napylennya bahatofunktsional'nykh pokryttiv] Scientific journal "Bulletin of the Khmelnytskyi National University". Technical sciences. No. 3 (273). 240–248. doi: 10.31891/2307–5732.
4. Ahieiev, M., Gritsuk, I., Litikova, A., Bilousov, I., Vrublevskyi, R., Boboshko, O., Smyrnov, O., Saraieva, I., Khudiakov, I., Pohorletskyi, D., (2021). Application of combined electric arc coatings for parts and units of vehicles recovery in Repair Technologies. SAE Technical Paper Series. doi:10.4271/2021-01-5100.
 5. Ageev M., Dovzhuk S., Nikolaychuk V. (2019) The Influence of Design Parameters for Electric arc Equipment on the Factors of Spray Process and Properties of Coatings. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences. Col.1(32). 114–122. DOI: <https://doi.org/10.32515/2664-262X>.
 6. Unger R., Belaschenko V., Kratochvil W. (1998) A new arc spray system to spray high density, low oxides coatings. Thermal spray: Proceeding of the 15th International conference. Edited by Coddet. Nice: 1989–1995.
 7. Lopata L.A. (2005) Research on restoration of «shaft» type automobile parts by electric arc metallization [Doslidzhennya vidnovlennya avtomobil'nykh detaley typu «val» elektroduhovoyu metalizatsiyeyu] «Construction and production technology of agricultural machines»: Collection. of science works Kirovohrad: Issue No. 35.409–416.
 8. Michio T., Nobuyuki A. (1992) Improvement of sprayed coatings with ultra high voltage EB melting. Trans. JWRI. 21, № 2. 229–300.
 9. Ageev M.S., Rudkovskyi A.V., Hryshchenko O.P., Solovyh E.K., Magopets S.O. (2020) Restoration of parts of means of transport by the combined method of application of multifunctional coatings [Vidnovlennya detaley zasobiv transportu kombinovanyim metodom nanesennya bahatofunktsional'nykh pokryttiv] Scientific journal «Bulletin of Khmelnytskyi National University». Technical sciences. № 3 (285). 268–277. DOI:10.31891/2307–5732.
 10. Lopata L., Smirnova T. (2019) Of combined electric arc coatings. International Scientific Journal Problems of Tribology. Vol. 24, № 3/93. 51–61. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-93-3-51-61>

**ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ
РИЗИКАМИ ВИНИКНЕННЯ АВАРІЙНИХ МОРСЬКИХ ПОДІЙ
І ЗАПОБІГАННЯ ЇМ**

А.Д. Бойко

аспірантка,

Київський інститут водного транспорту

імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного

Державного університету інфраструктури та технологій, Київ, Україна,

ORCID ID: 0000-0002-1387-3164

Анотація

Вступ. У статті розглянуто підхід до оцінки ефективності методів управління ризиками виникнення і запобігання аварійним морським подіям. У статті на основі прогнозної моделі, що реалізує запропоновані методи та модель, оптимізовано комплекс із заходів щодо зниження ризиків аварійних морських подій (АМП) під час експлуатації морського транспорту.

Мета. Метою статті є розробка інструментарію щодо комплексної оцінки ефективності удосконалених методів управління ризиками виникнення і запобігання АМП.

Результати. У результаті визначення для кожної АМП сумарних витрат встановлено, що ефективність скорочення несприятливого ризику реалізації АМП від впровадження запобіжних заходів становить від 18%. Отримана інформація за результатами використання методів оцінки та управління ризиками виникнення і запобігання АМП є основою для формування переліку заходів, що знижують ризик АМП, вжиття яких забезпечує мінімальні узагальнені витрати та найбільше скорочення ризиків, а також є необхідною умовою для прийняття рішення з управління чинниками ризиків на підставі критерію мінімуму узагальнених витрат.

Висновки. Визначено, що перспективним напрямом подальшого розвитку автоматизованої підсистеми управління неприйнятними ризиками на основі методів оцінки та управління ризиками виникнення і запобігання АМП є врахування взаємозв'язків між АМП, чинниками АМП, імовірності переходу одних аварійних морських подій в інші, впливу одного заходу зі зниження несприятливих ризиків АМП на кілька чинників.

Ключові слова: оцінка, ефективність, метод, аварійна морська подія, морський та річковий транспорт, ризик, збиток, ймовірність, чинник, система управління безпекою судноплавства.

ASSESSMENT OF EFFICIENCY OF METHODS OF RISK MANAGEMENT
AND PREVENTION OF MARITIME ACCIDENTS

A.D. Boiko

PhD Student,

Hetman Petro Konashevych-Sahaidachny Kyiv Institute of Water Transport
of the State University of Infrastructure and Technology, Kyiv, Ukraine,

ORCID ID: 0000-0002-1387-3164

Summary

Introduction. The article considers an approach to assessing the effectiveness of risk management methods for the occurrence and prevention of marine accidents. In the article, based on a forecast model that implements the proposed methods and model, a set of measures to reduce the risks of maritime accidents during the operation of maritime transport is optimized.

Purpose. The purpose of the article is to develop a toolkit for a comprehensive assessment of the effectiveness of improved methods of managing the risks of occurrence and prevention of AMPs.

Results. As a result of determining the total costs for each maritime accident, it was found that the effectiveness of reducing the adverse risk of maritime accidents from the implementation of preventive measures is from 18%. The information obtained from the results of the use of methods for assessing and managing the risks of occurrence and prevention of maritime accidents is the basis for the formation of a list of measures to reduce the risk of maritime accidents, the implementation of which provides the minimum generalized costs and the greatest reduction of risks and is also a prerequisite for deciding on risk management based on the criterion of minimum generalized costs.

Conclusions. It is determined that a promising direction for the further development of an automated subsystem for managing unacceptable risks based on methods for assessing and managing the risks of occurrence and prevention of maritime accidents is to consider the relationships between maritime accidents, maritime accident's factors, the probability of transition of one maritime accident to another, the impact of one measure to reduce the adverse risks of maritime accidents on several factors.

Key words: assessment, efficiency, method, maritime accident, maritime and river transport, risk, damage, probability, factor, navigation safety management system.

Вступ і постановка проблеми. Проблема управління ризиками у системі управління безпекою судноплавства (СУБС) натеper є невирішеною в повному обсязі та залишається на вістрі досліджень [1–4]. Аналіз результатів, отриманих під час вивчення процесів управління ризиками у системі управління безпекою (СУБ) судноплавства, дозволяє зробити висновок про таке. По-перше, у рамках проведених досліджень не враховуються результати оцінки узагальненого ризику виникнення аварійних морських подій (АМП) у системі управління безпекою судноплавства. По-друге, й критерій мінімальних сумарних витрат у разі розробки заходів загалом, що знижує ризики аварійних морських подій, також має обмежене використання у практичних застосуваннях [5–9; 12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [10] автором удосконалено метод оцінки узагальненого ризику виникнення аварійних морських подій

у системі управління безпекою судноплавства, який враховує найскладніші класи АМП (дуже серйозні аварії, серйозні аварії), типи чинників, що впливають на безпеку судноплавства, та визначають прийнятні та неприйнятні ризики для кожної аварійної морської події з використанням криволінійної трапеції прийнятного ризику, що дозволяє підвищити точність оцінки узагальненого ризику виникнення АМП з використанням морського та річкового транспорту.

У роботі [11] запропоновано метод управління неприйнятними ризиками для визначення витрат на запобігання виникненню АМП (дуже серйозних або серйозних аварій) і зниження потенційних збитків від них у системі управління безпекою судноплавства. У цьому методі враховуються всі заходи щодо зниження несприятливих ризиків виникнення АМП або запобігання їм з морським або річковим транспортом, що дозволяє забезпечити мінімальні витрати на запобігання ризикам виникнення АМП і зниження потенційного збитку від них.

Таким чином, наявна невідповідність між обмеженими можливостями відомих підходів до оцінки та управління ризиками у системі управління безпекою судноплавства, з одного боку, та потребами і вимогами практики щодо зниження ризиків АМП – з іншого, переростає у необхідність проведення кількісної та якісної оцінки ефективності методів управління ризиками виникнення і запобігання аварійним морським подіям.

Це визначає, що під час вирішення актуального наукового завдання, пов'язаного з удосконаленням методів і моделей оцінки та управління ризиками виникнення і запобігання АМП у системі управління безпекою судноплавства для зниження несприятливого ризику реалізації аварійної морської події, гарантовано виникає нагальна проблема в оцінці ефективності запропонованих удосконалених методів управління ризиками виникнення і запобігання аварійним морським подіям.

Формулювання цілей статті. Метою статті є розробка інструментарію щодо комплексної оцінки ефективності удосконалених методів управління ризиками виникнення і запобігання АМП.

Виклад основного матеріалу. За результатами аналізу звітів щодо стану безпеки судноплавства та аварійності на водному транспорті в Україні [5–9] визначено приклад узагальненого комплексу заходів (таблиця 1) щодо зниження ризиків АМП під час експлуатації морських (річкових) суден (коригуючих дій щодо усунення причин виникнення аварійних подій з метою підвищення рівня безпеки судноплавства та зниження рівня аварійності на водному транспорті).

Таблиця 1

Заходи зі зниження неприйнятного ризику та їх вартість

№	Зміст заходів	Вартість
1	Вивчення вимог СУБ судна та судновласника щодо врахування рівня оцінки ризику у разі слідування судна в обмежених умовах плавання по каналах, річкових внутрішніх водних шляхах тощо, зокрема з лоцманом на борту	E_1 100
2	Проведення тренувальних заходів щодо виконання членами екіпажу правил технічного обслуговування й експлуатації головних двигунів та допоміжних механізмів судна (відпрацювання дій на тренажерах)	E_2 1000

Продовження таблиці 1

3	Проведення тренувальних заходів щодо виконання вантажних операцій, дотримання плану щодо розміщення вантажу та баласту у танках з урахуванням навігаційних обмежень та безпечного запасу глибини під кілем судна (відпрацювання дій на тренажерах)	E_3	1000
4	Вивчення рекомендацій звичайної морської практики з практичних прийомів та способів управління судном, належної організації дій екіпажів суден в аварійній ситуації та завчасного визначення і врахування рівня оцінки ризику	E_4	100
5	Вивчення вимог Міжнародної конвенції про підготовку і дипломування моряків, зокрема щодо забезпечення ними належної організації несення вахтової служби на ходовому містку, а саме спостереження за рухом, позицією та місцем судна для забезпечення безаварійного плавання судна, у тому числі з лоцманом на борту	E_5	100
6	Проведення тренувальних заходів щодо практичних прийомів та способів управління судном, зокрема щодо взаємодії з морським лоцманом та капітанами буксирів під час виконання швартових операцій, а також вжиття вчасних та рішучих дій для забезпечення безпеки судна та запобігання навалу на причал, інші судна та об'єкти, що стоять біля причалу або на рейді (відпрацювання дій на тренажерах)	E_6	1000
7	Проведення тренувальних заходів щодо завчасного визначення і врахування рівня оцінки ризику, забезпечення належної організації дій екіпажів суден в аварійній ситуації, зокрема у разі заходу суден у порт, а також під час маневрування та виконання швартових операцій з використанням буксирного забезпечення на акваторії порту тощо (відпрацювання дій на тренажерах)	E_7	1000

Можливими заходами розглядаються такі, що проводяться капітаном та командним складом. При цьому вартість заходів зі зниження неприйнятної ризику розглядається в діапазоні 100–1000 у.о. залежно від того, чи то є заходи з вивчення нормативних документів, чи з відпрацювання дій на тренажерах.

Для підготовки вхідних даних для розрахунку оцінки ефективності були проаналізовані матеріали щодо розслідування АМП, які відбулися, у тому числі через людський фактор (таблиця 2). Важливо зазначити, що використання методів оцінки та управління ризиками виникнення та запобігання АМП у СУБС розглядається на підставі прогнозованої стратегії управління факторами ризику.

Відповідно до методу оцінки узагальненого ризику виникнення аварійних морських подій у СУБ судноплавства [10], інтенсивності потоків однорідних АМП, що розглядаються у цій роботі, отримані згідно з виразом (1) за 16 років та занесені у табл. 3:

$$\lambda_{\text{ЕМЕ}} = \frac{N}{T_0}, \quad (1)$$

де N – кількість АМП, що відбулися за час спостереження;

T_0 – час спостереження аварійних морських подій.

На основі значень часу функціонування водного транспорту (терміну експлуатації (див. табл. 2)) та значень інтенсивностей потоків однорідних АМП розраховується емпіричний коефіцієнт Пуассона a відповідно до виразу [10]:

$$a(\text{ЕМЕ}) = \lambda_{\text{ЕМЕ}} T_p, \quad (2)$$

Таблиця 2

Вхідні дані для розрахунку оптимальної ймовірності запобігання АМП

№	Опис АМП	Величина збитків	Причина виникнення АМП	Клас АМП	Термін експлуатації
1	У морському терміналі морського порту плавакран під впливом штормового вітру здійснив рефрижераторний наплив на рибальський траулер. Внаслідок напливу судно зазнало пошкоджень, що призвело до надходження забортної води до його трюмів. Надалі судно затонуло біля стінки причалу	68 000 у.о.	F_2^1 (несприятливі зовнішні умови); F_3^1 (відмови суднових технічних засобів та обладнання); F_5^1 (людські помилки); F_3^4 (зовнішні умови та впливи)	дуже серйозна аварія	20 років
2	Внаслідок затоплення біля причалу морського порту транспортного двогвинтового дизельного буксира в море потрапили нафтопродукти, у зв'язку з чим навколишньому природному середовищу завдано шкоди. Після підйому буксир не відновлено	3 381 541 у.о.	F_3^1 (відмови суднових технічних засобів та обладнання); F_5^1 (людські помилки); F_3^3 (аварійні пошкодження судна або його технічних засобів, що спричиняють розливи палива)	дуже серйозна аварія	27 років
3	Затоплення судна, пришвартованого другим бортом до іншого судна, що перебувало біля причалу в морському порту	45 347 у.о.	F_3^1 (відмови суднових технічних засобів та обладнання); F_5^1 (людські помилки)	дуже серйозна аварія	25 років
4	Під впливом вітру та хвиль стався обрив швартових кінців біля плавакрана і він, дрейфуючи, навалився на рибальське морське судно, яке отримало пробійні і в результаті затонуло	172 037 у.о.	F_2^1 (несприятливі зовнішні умови); F_3^1 (відмови суднових технічних засобів та обладнання); F_5^1 (людські помилки); F_3^4 (зовнішні умови та впливи)	дуже серйозна аварія	39 років
5	За 9 миль від морського порту в машинному відділенні буксира виникла пожежа, внаслідок якої судно втратило морехідні якості та експлуатаційні характеристики	92 537 у.с.	F_3^1 (відмови суднових технічних засобів та обладнання); F_5^1 (людські помилки); F_4^4 (аварійні пошкодження судна та суднових технічних засобів, пожежі та вибухи)	серйозна аварія	48 років

Продовження таблиці 2

6	У морському порту стався розлив бункерного палива з танкера з максимально негативними екологічними наслідками	1 657 428 у.о.	F_5^1 (людські помилки); F_3^3 (аварійні пошкодження судна або його технічних засобів, що спричиняють розливи палива та нафтопродуктів)	серйозна аварія	11 років
7	Посадка на міліну теплохода, внаслідок чого він отримав пошкодження обшивки корпусу, було частково загоплено машинне відділення та приміщення нижнього туристичного кубрика, спостерігалось надходження води до носової та правої кормової паливної цистерни	1 067 158 у.о.	F_3^1 (відмови суднових технічних засобів та обладнання); F_5^1 (людські помилки)	серйозна аварія	61 рік

Таблиця 3

Значення інтенсивностей потоків однорідних АМП, які розподіляються за законом Пуассона

№	Тип водного транспорту	Клас АМП	Значення інтенсивності потоків однорідних АМП (місяць ⁻¹)
1	Морський	Дуже серйозні аварії	0,0416
2	Морський	Серйозні аварії	0,2552
3	Річковий	Дуже серйозні аварії	0,0572
4	Річковий	Серйозні аварії	0,2187

Таблиця 4

Результати розрахунку емпіричного коефіцієнта Пуассона a

№	АМП	Тип транспорту	Значення емпіричного коефіцієнта Пуассона a
1	EME_1^{1n}	морський	0,04576
2	EME_2^{1n}	морський	0,0624
3	EME_3^{1n}	морський	0,0574
4	EME_4^{1n}	морський	0,0898
5	EME_1^{2n}	морський	0,663
6	EME_2^{2n}	морський	0,2552
7	EME_1^{2r}	річковий	0,739

де $\lambda_{\text{ЕМЕ}}$ – інтенсивність потоку однорідних АМП (рік⁻¹ або місяць⁻¹);

T_f – час функціонування водного транспорту (рік або місяць) у разі безпосереднього виконання переходу (одного рейсу).

Приклади розрахованих значень наведені в табл. 4 у відповідному стовпці. При цьому значення часу функціонування водного транспорту (місяць) у разі безпосереднього виконання переходу (одного рейсу), за статистичними даними, у середньому дорівнює 1 місяць для суден з терміном експлуатації до 18 років. А для суден з терміном експлуатації більше 18 років значення часу функціонування водного транспорту у разі безпосереднього виконання переходу пропорційне значенню терміну експлуатації відповідно до табл. 2 (що враховує збільшення часу на обслуговування більш застарілого судна).

Для кожного АМП з табл. 4 формується множина чинників (табл. 5) [10].

Таблиця 5

Результати формування матриць чинників для АМП

№	АМП	Множина чинників (причин) АМП
1	$ЕМЕ_1^{1n}$	$\{F_2^1, F_3^1, F_5^1\} \cup \{F_3^4\}$
2	$ЕМЕ_2^{1n}$	$\{F_3^1, F_5^1\} \cup \{F_1^3\}$
3	$ЕМЕ_3^{1n}$	$\{F_3^1, F_5^1\}$
4	$ЕМЕ_4^{1n}$	$\{F_2^1, F_3^1, F_5^1\} \cup \{F_3^4\}$
5	$ЕМЕ_1^{2n}$	$\{F_3^1, F_5^1\} \cup \{F_4^4\}$
6	$ЕМЕ_2^{2n}$	$\{F_5^1\} \cup \{F_1^3\}$
7	$ЕМЕ_1^{2r}$	$\{F_3^1, F_5^1\}$

Приклад визначення умовних ймовірностей за результатами експертного опитування та табл. 5 для кожної АМП $ЕМЕ_1^{1n}$, $ЕМЕ_2^{1n}$, $ЕМЕ_3^{1n}$, $ЕМЕ_4^{1n}$ у вигляді матриць у виразі 3:

$$\begin{bmatrix} P(F_2^1|ЕМЕ_1^{1n}) & P(F_3^1|ЕМЕ_1^{1n}) & P(F_5^1|ЕМЕ_1^{1n}) \\ P(F_2^1|ЕМЕ_2^{1n}) & P(F_3^1|ЕМЕ_2^{1n}) & P(F_5^1|ЕМЕ_2^{1n}) \\ P(F_2^1|ЕМЕ_3^{1n}) & P(F_3^1|ЕМЕ_3^{1n}) & P(F_5^1|ЕМЕ_3^{1n}) \\ P(F_2^1|ЕМЕ_4^{1n}) & P(F_3^1|ЕМЕ_4^{1n}) & P(F_5^1|ЕМЕ_4^{1n}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.3 & 0.5 \\ 0 & 0.4 & 0.6 \\ 0 & 0.3 & 0.7 \\ 0.25 & 0.2 & 0.65 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} P(F_1^3|ЕМЕ_1^{1n}) \\ P(F_1^3|ЕМЕ_2^{1n}) \\ P(F_1^3|ЕМЕ_3^{1n}) \\ P(F_1^3|ЕМЕ_4^{1n}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} P(F_3^4|ЕМЕ_1^{1n}) \\ P(F_3^4|ЕМЕ_2^{1n}) \\ P(F_3^4|ЕМЕ_3^{1n}) \\ P(F_3^4|ЕМЕ_4^{1n}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Матриці формуються для кожної групи чинників окремо, а саме з чинниками, що впливають на безпеку самого судна, з чинниками, що впливають на безпеку людини; що впливають на безпеку навколишнього середовища; що впливають на безпеку вантажу. При цьому формується повна група матриць з урахуванням всіх АМП відповідного класу. Наприклад, АМП $ЕМЕ_1^{1n}$, відповідно до табл. 5

$\{F_2^1, F_3^1, F_5^1\} \cup \{F_3^4\}$, фіксується у двох матрицях першої і четвертої групи чинників з відповідними значеннями. А оскільки є АМП першого класу, а саме EME_2^{1n} , чинник якої входить до третьої групи чинників, АМП EME_1^1 фіксується і у відповідній матриці, але зі значенням 0.

Приклад визначення величини очікуваного збитку за статистичними даними для кожного чинника і формальне представлення розрахованих величин у вигляді матриці наведено у виразі 4 (значення величини очікуваного збитку (10^3 у.о.)):

$$\begin{bmatrix} Y(F_2^1|EME_1^{1n}) & Y(F_3^1|EME_1^{1n}) & Y(F_5^1|EME_1^{1n}) \\ Y(F_2^1|EME_2^{1n}) & Y(F_3^1|EME_2^{1n}) & Y(F_5^1|EME_2^{1n}) \\ Y(F_2^1|EME_3^{1n}) & Y(F_3^1|EME_3^{1n}) & Y(F_5^1|EME_3^{1n}) \\ Y(F_2^1|EME_4^{1n}) & Y(F_3^1|EME_4^{1n}) & Y(F_5^1|EME_4^{1n}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8 & 10 & 38 \\ 0 & 900 & 981 \\ 0 & 10 & 25 \\ 40 & 30 & 72 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} Y(F_1^3|EME_1^{1n}) \\ Y(F_1^3|EME_2^{1n}) \\ Y(F_1^3|EME_3^{1n}) \\ Y(F_1^3|EME_4^{1n}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1300 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} Y(F_3^4|EME_1^{1n}) \\ Y(F_3^4|EME_2^{1n}) \\ Y(F_3^4|EME_3^{1n}) \\ Y(F_3^4|EME_4^{1n}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12 \\ 0 \\ 0 \\ 30 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

З огляду на дані, приклад (2) та (4), визначаються ризики виникнення АМП за одним чинником як математичного сподівання величини збитку від небажаної події (табл. 6) [10].

Таблиця 6

Результати визначення ризиків виникнення аварійної морської події за одним чинником

№	АМП	Значення ризиків виникнення АМП за одним чинником (у.о.)
1	EME_1^{1n}	$R_1(F_2^1 EME_1^{1n})=217.6$
		$R_2(F_3^1 EME_1^{1n})=408$
		$R_3(F_5^1 EME_1^{1n})=2584$
		$R_4(F_3^4 EME_1^{1n})=1632$
2	EME_2^{1n}	$R_5(F_3^1 EME_2^{1n})=67320$
		$R_6(F_5^1 EME_2^{1n})=110068.2$
		$R_7(F_1^3 EME_2^{1n})=243100$
3	EME_3^{1n}	$R_8(F_3^1 EME_3^{1n})=519$
		$EME_3^{1n}=3027,5$
4	EME_4^{1n}	$R_{10}(F_2^1 EME_4^{1n})=2700$
		$R_{11}(F_3^1 EME_4^{1n})=1620$
		$R_{12}(F_5^1 EME_4^{1n})=12636$
		$R_{13}(F_3^4 EME_4^{1n})=112636$

Продовження таблиці 6

5	EME_1^{2n}	$R_{14}(F_3^1 EME_1^{2n})=16320$
		$R_{15}(F_5^1 EME_1^{2n})=63648$
		$R_{16}(F_4^4 EME_1^{2n})=40800$
6	EME_2^{2n}	$R_{17}(F_3^1 EME_2^{2n})=617355$
		$R_{18}(F_1^3 EME_2^{2n})=650250$
7	EME_1^{2r}	$R_{19}(F_3^1 EME_1^{2r})=199800$
		$R_{20}(F_3^1 EME_1^{2r})=11919180$

Будується криволінійна трапеція прийняттного ризику (з використанням поліноміальної регресії) та визначається прийнятність ризику для кожної АМП (приклад наведено на рис. 1).

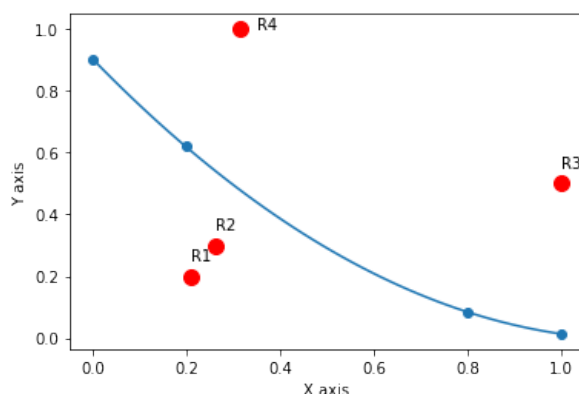


Рис. 1. Криволінійна трапеція прийняттного ризику та визначення прийнятності ризику для АМП EME_i^{ln}

Для кожної АМП формуємо множину неприйнятних ризиків $\{\bar{R}_j(F_i^n|EME_j^t)\}$, які необхідно обробляти. Для визначення прийнятності ризику для кожної АМП отриману оцінку ризику перевіряємо на приналежність до криволінійної трапеції прийнятного ризику. Якщо значення $R_j(F_i^n|EME_j^t)$ задовольняють системі рівнянь [10], при цьому значення ризику візуально знаходиться нижче або на лінії регресії, то ризик вважається прийнятним, і стає частиною множини прийнятних ризиків $\{R_j(F_i^n|EME_j^t)\}$. Вважаємо, що такий ризик обробки не потребує.

Якщо значення $R_j(F_i^n|EME_j^t)$ не задовольняють системі рівнянь, при цьому значення ризику візуально знаходиться вище лінії регресії, то ризик є неприйнятним і стає частиною множини неприйнятних ризиків $\{\bar{R}_j(F_i^n|EME_j^t)\}$, які необхідно обробляти.

Після чого розраховується математичне сподівання неприйнятного ризику для кожної АМП з множини $\{\bar{R}_j(F_i^n|EME_j^t)\}$ за всіма чинниками й очікуваним середнім збитком відповідно до виразу:

$$R_j^t = \sum_{i=1}^5 \lambda_j T_f Y(F_i^1 | EME_j^t) P(F_i^1 | EME_j^t) + \sum_{i=1}^4 \lambda_j T_f Y(F_i^2 | EME_j^t) P(F_i^2 | EME_j^t) + \sum_{i=1}^5 \lambda_j T_f Y(F_i^3 | EME_j^t) P(F_i^3 | EME_j^t) + \sum_{i=1}^4 \lambda_j T_f Y(F_i^4 | EME_j^t) P(F_i^4 | EME_j^t) = \lambda_j T_f (\sum_{i=1}^5 Y(F_i^1 | EME_j^t) P(F_i^1 | EME_j^t) + \sum_{i=1}^4 Y(F_i^2 | EME_j^t) P(F_i^2 | EME_j^t) + \sum_{i=1}^5 Y(F_i^3 | EME_j^t) P(F_i^3 | EME_j^t) + \sum_{i=1}^4 Y(F_i^4 | EME_j^t) P(F_i^4 | EME_j^t)). \quad (5)$$

Результати розрахунків наведені у табл. 7.

У цьому прикладі будемо вважати, що всі судна належать різним власникам (компаніям). У зв'язку з цим узагальнений ризик виникнення АМП (які вже є різнорідними стосовно одна одної) у цьому прикладі не визначається.

Таблиця 7

Результати визначення неприйнятних ризиків виникнення АМП за всіма чинниками

№	Значення неприйнятних ризиків виникнення АМП за одним чинником (у.о.)	Значення ризиків виникнення АМП за всіма чинниками (у.о.)
1	$\bar{R}_3(F_5^1 EME_1^{1n})=2584$	$R_1^{1n} = 4216$
	$\bar{R}_4(F_3^4 EME_1^{1n})=1632$	
2	$\bar{R}_5(F_3^1 EME_2^{1n})=67320$	$R_2^{1n} = 420488,2$
	$\bar{R}_6(F_5^1 EME_2^{1n})=110068,2$	
	$\bar{R}_7(F_1^3 EME_2^{1n})=243100$	
3	$\bar{R}_9(F_5^1 EME_3^{1n})=3027,5$	$R_3^{1n} = 3027,5$
4	$\bar{R}_{12}(F_5^1 EME_4^{1n})=12636$	$R_4^{1n} = 125272$
	$\bar{R}_{13}(F_3^4 EME_4^{1n})=112636$	
5	$\bar{R}_{15}(F_5^1 EME_1^{2n})=63648$	$R_1^{2n} = 104448$
	$\bar{R}_{16}(F_4^4 EME_1^{2n})=40800$	
6	$\bar{R}_{17}(F_5^1 EME_2^{2n})=617355$	$R_2^{2n} = 1267605$
	$\bar{R}_{18}(F_1^3 EME_2^{2n})=650250$	
7	$\bar{R}_{20}(F_3^1 EME_1^{2r})=11919180$	$R_1^{2r} = 11919180$

Відповідно до методу управління неприйнятними ризиками для визначення витрат на запобігання АМП і зниження можливих збитків від них у СУБ судноплавства виконуються такі дії [11].

Сформуємо матриці ймовірностей запобігання для АМП, що сталася через причину чинника F_i^n , для морського транспорту з урахуванням статистичних даних [11]:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} P(F_3^1|E_1) & P(F_5^1|E_1) \\ P(F_3^1|E_2) & P(F_5^1|E_2) \\ P(F_3^1|E_3) & P(F_5^1|E_3) \\ P(F_3^1|E_4) & P(F_5^1|E_4) \\ P(F_3^1|E_5) & P(F_5^1|E_5) \\ P(F_3^1|E_6) & P(F_5^1|E_6) \\ P(F_3^1|E_7) & P(F_5^1|E_7) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.8 \\ 0.4 & 0.85 \\ 0.55 & 0.9 \\ 0.6 & 0.8 \\ 0.5 & 0.9 \\ 0.4 & 0.85 \\ 0.6 & 0.75 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P(F_1^3|E_1) \\ P(F_1^3|E_2) \\ P(F_1^3|E_3) \\ P(F_1^3|E_4) \\ P(F_1^3|E_5) \\ P(F_1^3|E_6) \\ P(F_1^3|E_7) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.6 \\ 0.55 \\ 0.65 \\ 0.45 \\ 0.5 \\ 0.6 \\ 0.6 \end{bmatrix} \\
 & \begin{bmatrix} P(F_3^4|E_1) & P(F_4^4|E_1) \\ P(F_3^4|E_2) & P(F_4^4|E_2) \\ P(F_3^4|E_3) & P(F_4^4|E_3) \\ P(F_3^4|E_4) & P(F_4^4|E_4) \\ P(F_3^4|E_5) & P(F_4^4|E_5) \\ P(F_3^4|E_6) & P(F_4^4|E_6) \\ P(F_3^4|E_7) & P(F_4^4|E_7) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.5 \\ 0.45 & 0.6 \\ 0.55 & 0.65 \\ 0.6 & 0.45 \\ 0.45 & 0.55 \\ 0.5 & 0.6 \\ 0.65 & 0.6 \end{bmatrix}. \quad (6)
 \end{aligned}$$

За результатами перевірки граничних умов [11] виконуються розрахунки узагальнених витрат V_{gen} , що відповідають оптимальній імовірності запобігання АМП (таблиця 8). При цьому коефіцієнт V_{ois} [11] розглядається як постійна процесу, яка визначає розмір вкладених коштів у забезпечення безпеки плавання, за підсумками чого процес підвищення рівня безпеки плавання, що визначається експонентою, досягає 95% рівня асимптоти ймовірності запобігання вкладенням у заходи, що знижують ризик АМП. Результати скорочення несприятливого ризику реалізації АМП від впровадження запобіжних заходів у процентному відношенні представлені на рис. 2.

Таблиця 8

Результати визначення узагальнених витрат, що відповідають оптимальній імовірності запобігання аварійним морським подіям

№	Значення неприйнятних ризиків виникнення АМП за всіма чинниками	Узагальнене значення несприятливого ризику у разі впровадження заходів, спрямованих на його запобігання (зниження)
1	$R_1^{1n} = 4216$	$R'_1 = 3469,63$
2	$R_2^{1n} = 420488,2$	$R'_2 = 384754,74$
3	$R_3^{1n} = 3027,5$	$R'_3 = 2973$
4	$R_4^{1n} = 125272$	$R'_4 = 120157,01$
5	$R_5^{1n} = 104448$	$R'_5 = 85932,96$
6	$R_6^{2n} = 1267605$	$R'_6 = 1083041,1$

Отримана інформація є основою для формування переліку заходів, що знижують ризик АМП. Їх вжиття забезпечує мінімальні узагальнені витрати та найбільше скорочення ризиків, а також є необхідною умовою для прийняття рішення з управління чинниками ризиків на підставі критерію мінімуму узагальнених витрат.

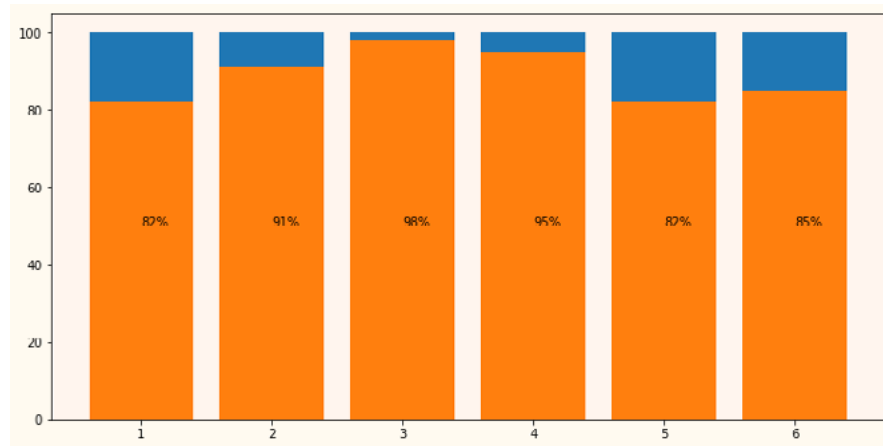


Рис. 2. Ефективність скорочення несприятливого ризику реалізації АМП від впровадження запобіжних заходів

Висновки. Таким чином, у статті на основі прогнозової моделі, що реалізує запропоновані методи та модель, оптимізовано комплекс із 7 заходів щодо зниження ризиків АМП (дуже серйозних та серйозних аварій) під час експлуатації морського транспорту. У результаті визначення для кожної АМП сумарних витрат встановлено, що ефективність скорочення несприятливого ризику реалізації АМП від впровадження запобіжних заходів становить від 82% до 98%. Отримана інформація за результатами використання методів оцінки та управління ризиками виникнення і запобігання АМП є основою для формування переліку заходів, що знижують ризик АМП, вжиття яких забезпечує мінімальні узагальнені витрати та найбільше скорочення ризиків, а також є необхідною умовою для прийняття рішення з управління чинниками ризиків на підставі критерію мінімуму узагальнених витрат. Визначено, що перспективним напрямом подальшого розвитку автоматизованої підсистеми управління неприйнятними ризиками на основі методів оцінки та управління ризиками виникнення і запобігання АМП є врахування взаємозв'язків між АМП, чинниками АМП, ймовірності переходу одних аварійних морських подій в інші, впливу одного заходу зі зниження несприятливих ризиків АМП на кілька чинників.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kristiansen S. Maritime Transportation: Safety Management and Risk Analysis. Elsevier. 2010. P. 508 p.
2. Guçma M. Combination of processing methods for various simulation data sets. *TransNav*. 2008. № 2(1). P. 11–15. DOI: 10.26906/SUNZ.2023.1.004.
3. Kobyliński L. Risk analysis and human factor in prevention of CRG casualties. *TransNav*. 2009. № 3 (4). P. 443–448.
4. Yin J. Quantitative Risk Assessment for Maritime Safety Management: PhD thesis. Hong Kong Polytechnic University. 2011. URL: <http://repository.lib.polyu.edu.hk/jspui/bitstream/>.

5. Аварії та інциденти на морському та річковому транспорті за 2018 рік. Офіційний сайт Укртрансбезпеки. Аналіз аварійності. URL: <http://dsbt.gov.ua/storinka/avariyi-ta-incydynty-na-morskomu-ta-richkovomutransporti-za-2018-rik> (дата звернення: 01.12.2022).
6. Стан аварійності та безпеки судноплавства на водному транспорті в Україні (у тому числі і за її межами, але з українськими суднами), включаючи маломірні (малі) судна, за 1 півріччя 2019 року з наростаючим підсумком. Офіційний сайт Морської адміністрації України. URL: <https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/public-information/analiz-4-avariynosti-za-2-kv-2019.docx> (дата звернення: 01.12.2022).
7. Стан аварійності та безпеки судноплавства на водному транспорті в Україні (у тому числі і за її межами, але з українськими суднами), включаючи маломірні (малі) судна, за 2019 рік з наростаючим підсумком. Офіційний сайт Морської адміністрації України. URL: <https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/public-information/analiz-avariynostiza-2019.pdf> (дата звернення: 01.12.2022).
8. Стан безпеки судноплавства та аварійності на водному транспорті в Україні (у тому числі і за її межами, але з українськими суднами), включаючи маломірні (малі) судна, за 2020 рік з наростаючим підсумком. Офіційний сайт Морської адміністрації України. URL: https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/16012021/Zvit_2020.pdf (дата звернення: 01.12.2022).
9. Стан безпеки судноплавства та аварійності на водному транспорті в Україні (у тому числі і за її межами, але з українськими суднами), включаючи маломірні (малі) судна, за перше півріччя 2021 року з наростаючим підсумком. Офіційний сайт Морської адміністрації України. URL: https://data.gov.ua/dataset/cf069d00-9793-4974-9367-d39796282a59/resource/f9fa8a7c-74eb-4e62-ae62-7bcef5a02e/download/zvit_1pivrich_2021.pdf (дата звернення: 01.12.2022).
10. Калініченко Є.В., Постников Є.Є., Бойко А.Д. Метод оцінки узагальненого ризику виникнення аварійних морських подій у системі управління безпекою судноплавства. *Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. 2022. № 2 (36). С. 20–30. URL: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.02>.
11. Ярмак В.Л., Бойко А.Д. Метод управління неприйнятними ризиками для визначення витрат на запобігання аварійним морським подіям і зниження можливих збитків від них у системі управління безпекою судноплавства. *Системи управління, навігації та зв'язку* : збірник наукових праць. Полтава. ПНТУ, 2023. № 1(71). С. 4–9. URL: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.1.004>
12. Inter-Object Navigation of Unmanned Aerial Vehicles to Increase the Efficiency and Accuracy of Inspection of Power Lines / O. Tymoschuk, O. Tymochko, V. Fustii, G. Kolesnyk, S. Olizarenko, G. Kalashnyk, R. Kulish, D. Galinskji. *Problemele energeticii regionale*. 2023. № 1(57). P. 28–38.

REFERENCES

1. Kristiansen, S. (2010). *Maritime Transportation: Safety Management and Risk Analysis*. Elsevier. P. 508.
2. Gucma, M. (2008). Combination of processing methods for various simulation data sets. *TransNav*. № 2(1). P. 11–15. DOI: 10.26906/SUNZ.2023.1.004.
3. Kobyliński, L. (2009). Risk analysis and human factor in prevention of CRG casualties. *TransNav*. № 3 (4). P. 443–448.
4. Yin, J. (2011). *Quantitative Risk Assessment for Maritime Safety Management: PhD thesis*. Hong Kong Polytechnic University. Retrieved from: <http://repository.lib.polyu.edu.hk/jspui/bitstream/>.
5. Accidents and incidents on sea and river transport in 2018. Official website of Ukrtransbezpeka. Accident analysis. Retrieved from: <http://dsbt.gov.ua/storinka/avariyi-ta-incydynty-na-morskomu-ta-richkovomu-transporti-za-2018-rik> (Last accessed: 01.12.2022).
6. The state of emergency and safety of navigation on water transport in Ukraine (including outside its borders, but with Ukrainian vessels), including small-sized (small) vessels for the first half of 2019 with an increasing sub-total. Official website of the Maritime Administration of Ukraine. Retrieved from: <https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/public-information/analiz-4-avariynosti-za-2-kv-2019.doc> (Last accessed: 01.12.2022).
7. State of emergency and safety of navigation on water transport in Ukraine (including outside its borders, but with Ukrainian vessels), including small-sized (small) vessels for 2019 with a cumulative total. Official website of the Maritime Administration of Ukraine. Retrieved from: <https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/public-information/analiz-avariynostiza-2019.pdf> (Last accessed: 01.12.2022).
8. The state of navigation safety and accidents on water transport in Ukraine (including outside its borders, but with Ukrainian vessels), including small-sized (small) vessels for 2020 with a cumulative total. Official website of the Maritime Administration of Ukraine. Retrieved from: https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/16012021/Zvit_2020.pdf (Last accessed: 01.12.2022).
9. The state of navigation safety and accidents on water transport in Ukraine (including outside its borders, but with Ukrainian vessels), including small-sized (small) vessels for the first half of 2021 with an increasing total. Official website of the Maritime Administration of Ukraine. Retrieved from: https://data.gov.ua/dataset/cf069d00-9793-4974-9367-d39796282a59/resource/f9fa8a7c-74eb-4e62-ae62-7bcef5a02e/download/zvit_1pivrich_2021.pdf (Last accessed: 01.12.2022).
10. Kalinichenko, E.V., Postnikov, E.E., Boyko, A.D. (2022). The method of assessing the generalized risk of the occurrence of emergency marine events in the system of managing the safety of navigation Water transport [Metod otsinky uzahalnenoho ryzyku vynyknennia avariinykh morskykh podii u systemi upravlinnia bezpekoiu sudnoplavstva].

Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies. No. 2 (36). P. 20–30. Retrieved from: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.02>.

11. Yarmak, V.L., Boyko, A.D. (2023). The method of managing unacceptable risks to determine the costs of preventing emergency marine events and reducing possible losses from them in the navigation safety management system of the Control, Navigation and Communication Systems. Collection of scientific works. Poltava. PNTU. No. 1(71). P. 4–9. Retrieved from: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.1.004>.
12. Tymoschuk, O., Tymochko, O., Fustii, V., Kolesnyk, G., Olizarenko, S., Kalashnyk, G., Kulish, R., Galinskji, D. (2023). Inter-Object Navigation of Unmanned Aerial Vehicles to Increase the Efficiency and Accuracy of Inspection of Power Lines. *Problemele energeticii regionale*, No. 1(57), pp. 28–38.

**DETERMINATION OF THE OPTIMAL CARGO OPERATIONS
STRATEGY OF A BULK CARRIER VESSEL, WITH CONTINUOUS
ENSURING ITS SEAWORTHINESS**

O.S. Bolgov

Deep sea navigator, Postgraduate Student at the Department of Navigation,
State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-0339-5533

Summary

Introduction. Maritime safety is an important aspect of the shipping industry. Ensuring that the vessel's seaworthy parameters are within acceptable limits throughout the voyage, including during cargo operations, is a key element of this safety. The International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS) requires vessel personnel to plan and carry out cargo operations in such a way that the ship always meets the seaworthiness criteria. Bulk carriers are subject to more stringent seaworthiness and safety requirements, particularly with regard to stability and hull strength. The correct loading of bulk carriers is essential for their maritime safety. Inadequate loading can lead to various risks, including compromised hull strength, reduced stability and violation of the vessel's seaworthiness. Existing shipboard instruments do not allow for timely planning and real-time control of loading operations, which can lead to potential risks. Creating a cargo operations plan takes considerable time and efforts of the responsible bulk carrier personnel, and these plans will not always be the best in terms of ensuring the vessel's current seaworthiness. The high intensity of loading operations at dry bulk terminals exacerbates the problem, as there is often insufficient time to adequately prepare and verify loading plans, increasing the risk of overloading cargo holds.

Purpose. The article proposes the development of new methods for bulk carriers cargo operations planning. These methods would optimise the distribution of bulk cargo, taking into account factors such as port facilities, ship design and nautical restrictions of the planned voyage. The aim is to formalise the parameters that affect the ship's seaworthiness in the form of a mathematical model and to establish functional relationships between them. By analysing the relationships between different parameters, the researchers aim to determine the best strategy for cargo operations that will ensure the continuous seaworthiness of the bulk carriers. This approach would help to improve bulk carrier's safety and reduce the risks associated with incorrect loading.

Results. The article proposes a new approach to planning bulk carrier cargo operations. This approach allows for the optimisation of the distribution of bulk cargoes during cargo operations, taking into account factors such as port capabilities, vessel design and navigational constraints of the planned voyage. The parameters affecting a vessel's seaworthiness have been formalised and functional relationships between them established. By analysing these relationships, the researchers sought to identify a method

for finding the best cargo operations strategy to ensure the continued seaworthiness of bulk carriers. Such a method would help to improve bulk carrier's safety and reduce the risks associated with improper loading.

Conclusions. The article proposes a method, based on the theories of systems analysis and operations research, as well as mathematical modelling, for optimising the cargo operations and maintaining the seaworthiness of bulk carriers. The main objective is to ensure that the vessel's seaworthiness parameters, including stability, overall longitudinal strength and local strength, remain within acceptable limits throughout the voyage, including the period of cargo operations in port. Careful management of the bulk vessel's cargo and ballast operations will ensure that these critical parameters are maintained within acceptable limits at all times, which is essential to prevent accidents and protect life and property at sea.

Key words: bulk carrier, maritime safety, cargo operations, optimisation, permissible loading, ship stability, the vessel strength.

ПОШУК ОПТИМАЛЬНОЇ СТРАТЕГІЇ ВАНТАЖНИХ ОПЕРАЦІЙ НАВАЛЮВАЛЬНОГО СУДНА ЗА УМОВИ ПОСТІЙНОГО ЗБЕРЕЖЕННЯ ЙОГО МОРЕХІДНИХ ЯКОСТЕЙ

О.С. Болгов

штурман далекого плавання, аспірант кафедри судноводіння,
Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-0339-5533

Анотація

Вступ. Безпека мореплавства є важливим аспектом морської індустрії. Забезпечення параметрів морехідної безпеки судна в допустимих межах протягом всього рейсу, у тому числі і під час вантажних операцій, є одним із ключових елементів цієї безпеки. Міжнародна конвенція з безпеки людей на морі (СОЛАС) вимагає, щоб судовий персонал планував і проводив вантажні операції таким чином, щоб судно завжди відповідало критеріям мореплавства. Для навалювальних суден (балкерів) існують підвищені вимоги щодо морехідної безпеки і насамперед вони стосуються їх остійності та повздоанької міцності.

Існуючі на навалювальних суднах документація та інструменти не охоплюють всі можливі ситуації завантаження судна, різноманітність номенклатури вантажів, специфіку майбутнього рейсу та не дозволяють своєчасно планувати і контролювати вантажні операції в режимі реального часу, що може призвести до потенційних ризиків. Створення плану вантажних операцій займає значний час і зусилля відповідального персоналу балкера, і ці плани не завжди будуть найкращими з точки зору забезпечення поточних морехідних якостей судна. Висока інтенсивність вантажних операцій на суховантажних терміналах загострює проблему, оскільки часто не вистачає часу на належну підготовку і перевірку планів навантаження, що підвищує ризик перевантаження трюмів.

Для ефективного визначення оптимальних варіантів завантаження суден повинні використовуватись методи, що дозволять автоматично моделювати вантажні операції та оцінювати параметри морехідності судна. Ці методи

повинні враховувати різноманітні фактори, такі як технічні особливості самого судна, характеристики вантажів та умови рейсу.

Мета. Метою статті є аналіз можливостей визначення допустимих варіантів завантаження навалювального судна, які задовольняють обмеженням, що накладаються параметрами морехідної безпеки, а також формалізація параметрів, що впливають на морехідність судна, та встановлення функціональних зв'язків між ними для подальшої побудови ефективної математичної моделі судна.

Результати. У статті запропоновано новий підхід до планування вантажних операцій балкерів. Цей підхід дозволить оптимізувати розподіл навалювальних вантажів під час вантажних операцій з урахуванням таких факторів, як портові можливості, конструкція судна та навігаційні обмеження запланованого рейсу. Проведена формалізація параметрів, що впливають на морехідність судна, та встановлені функціональні зв'язки між ними. Аналізуючи ці взаємозв'язки, дослідники прагнули визначити метод для пошуку найкращої стратегії проведення вантажних операцій, який забезпечить безперервну мореплавність балкерів. Такий метод допоможе підвищити безпеку балкерів та зменшити ризики, пов'язані з неправильним завантаженням.

Висновки. У статті запропоновано метод, що базується на теоріях системного аналізу та дослідження операцій, а також математичного моделювання, для оптимізації вантажних операцій та підтримання морехідних якостей навалювального судна. Ключова мета – забезпечити, щоб параметри морехідності судна, зокрема остійність, загальна поздовжня і локальна міцність, залишалися в прийнятних межах протягом усього рейсу включно з періодом вантажних операцій в порту. Завдяки ретельному управлінню вантажними і баластними операціями судна можна досягти постійного дотримання цих критичних параметрів в допустимих межах, що є критичним для запобігання аваріям та збереження життя та майна на морі.

Ключові слова: навалювальне судно, морехідна безпека, вантажний план, оптимізація, остійність, міцність судна.

Introduction. Maritime safety includes maintaining the acceptable limits of a ship's seaworthiness parameters. These parameters are maintained by proper loading of the vessel during cargo operations. The stability and strength criteria apply to all categories of vessels and are defined in the conventions of the International Maritime Organisation (IMO). Cargo handling in ports has a significant impact on the safety of shipping, especially for bulk carriers.

Statement of the problem and analysis of recent research. The seaworthiness is an abstract concept used in maritime law that indicates how safe and ready a vessel is to sail. In the broadest sense, seaworthiness means the fitness of the vessel to meet the ordinary hazards contemplated for the voyage. The concept of seaworthiness also extends to the fitness of the vessel to receive, carry and care for its intended cargo. Regular inspections must be carried out to ensure that the highest standards are maintained on board the vessel at all times. If shipowners are found to be negligent, they will face severe action.

Presenting main material. In accordance with the International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), it is mandatory for a vessel's crew to carefully plan and execute loading operations to ensure that the vessel remains seaworthy throughout the process and ready to sail at any stage of port operations.

To ensure the seaworthiness of dry bulk carriers, each ship is designed by the shipbuilder with specific guidelines for loading options. These guidelines are set out in the loading manual or in specialised computer loading programs, which enable the ship's seaworthiness parameters to be assessed on the basis of the loading option selected. It is the responsibility of the ship's cargo officer to determine the most suitable loading option within the ship's allowable stability and strength parameters.

However, existing documentation for typical ship cargoes covers only a limited range of loading scenarios and may not cover all possible loading situations or the specific requirements of a particular voyage. As a result, finding the optimal cargo plan can require considerable effort on the part of the ship's personnel. In the fast-paced environment of modern dry bulk terminals, where time constraints often prevent thorough preparation and verification of new cargo plans, there is an inherent risk of overloading individual cargo holds. This can compromise the local and longitudinal strength of the hull and ultimately the seaworthiness of the ship. The use of modern computer technology makes it possible to calculate the permissible ship loading, taking into account the restrictions of the seaworthiness criteria, provided that the ship loading process is formalised and loading algorithms and programs are developed.

A method (strategy) should be developed for the optimal distribution of a given amount of dry bulk cargo, taking into account the available port cargo facilities and the design characteristics of the vessel itself, while maintaining the parameters of its draft, trim, stability and overall longitudinal strength.

The development of such a method should be based on theories of systems analysis and operations research as well as mathematical modelling tools.

To solve this problem, it is necessary to formalise the cargo operations in terms of a mathematical model of the ship and to identify the functional relationship between the parameters that affect the seaworthiness of the vessel.

Clearly, the development of this method is a relevant and promising area of scientific research aimed at ensuring the safety of bulk carriers.

The subject of maritime safety in relation to bulk carriers is examined in the next sources [1; 2; 3].

The International Maritime Organisation (IMO) has established conventions that provide guidelines for the planning and execution of bulk carrier cargo operations [4–7].

An important resource for understanding the safe operation of bulk carriers is the knowledge and experience of seafarers actively involved in this field [8–11].

Gaichenya O.V. and Klimenko E.N. proposed the application of systems analysis and operations research principles to the cargo operations of bulk carriers and multipurpose vessels [12; 13].

The authors Tsymbal M.M. and Vaskov Y.Y. [14; 15] introduce mathematical models aimed at optimising the loading processes of bulk carriers and solve this problem by applying linear programming techniques.

The study presented in [16] focuses on the selection of a specific selection of bulk carrier cargo holds for efficient loading of bulk cargoes. It outlines a method for structuring the stages of bulk carrier loading operations when dealing with non-standard loads.

The aim of this article is to examine the potential methods for determining acceptable variations in ship loading that comply with the constraints imposed by maritime safety parameters. While complying with the general requirements for maritime safety, different types of ships have additional specifications based on their design or cargo carrying technology.

Consequently, specific requirements are imposed on general cargo vessels when loading general cargo. These requirements mainly include ensuring compatibility of cargoes within a single cargo space, accommodating a large number of cargoes for transportation, adhering to a specific sequence of ports for discharge and limiting the number of cargo levels based on the strength of the cargo packaging.

Bulk carriers have more stringent loading requirements due to their considerable length. These requirements are imposed by the overall longitudinal and local strength of the ship's hull, which affects various aspects of cargo operations. In particular, bulk carriers typically carry out cargo and ballast operations simultaneously. These operations are carried out in several stages (up to twenty), depending on the number of holds to be handled simultaneously and the specific cargo volume.

Shipbuilders usually provide specific loading manuals for bulk carriers, tailored to the cargo volume and number of holds involved. These manuals focus exclusively on a single type of cargo to be loaded. Each manual outlines a sequence of loading stages, specifying which holds are to be loaded, the corresponding cargo increments and the combination of tanks used for ballast operations. At the end of each stage, the ship must be in an acceptable seaworthy condition.

Difficulties arise when dealing with non-standard loading situations not covered by the shipbuilder's instructions. The planning and execution of cargo operations in such cases becomes challenging, as it is necessary to ensure the seaworthiness of the vessel and optimise the utilisation of cargo space and deadweight capacity. Shipowners are forced to develop a series of steps that address the problem of maximising cargo placement in the holds while taking into account the simultaneous handling of the required group of ballast tanks. Compliance with numerous seaworthiness restrictions becomes a critical aspect in these scenarios.

In order to build a mathematical model for optimising the loading process of a bulk carrier, it is necessary to formalise it, which systematises complex various processes associated with cargo and ballast operations.

To describe the loading process of a vessel, it is necessary to define a set or space of its states U , and each specific loading state of a vessel u belonging to this set U should be defined as a set of parameters of the vessel's seaworthy parameters, which depend on the distribution of cargo in holds and ballast and reserves in tanks and vessel's compartments. Thus, each specific loading state of a vessel u can be accepted as a certain variant of the distribution of cargo, ballast and supplies to the respective holds, tanks and spaces.

Each vessel's condition u can be analytically expressed as follows.

$$u = \{w_{ci}, w_{bi}, w_{zi}\}, \quad (1)$$

where is w_{ci} the weight of cargo in the i -th cargo space;

w_{bi} – is the weight of ballast in the i -th ballast tank;

w_{zi} – weight of stores in the i -th tank or storage space;

$i = 1, 2, \dots, n$ – number of cargo spaces, ballast tanks and storage spaces, respectively.

Thus, the state of the vessel u can be represented as an n -dimensional vector, the number of elements of which is equal to the total number of cargo holds, ballast tanks and storage spaces involved in the cargo operations. The weight loads w_{ci} , w_{bi} , w_{zi} in the vessel's state vector are defined by upper limits $\overline{w_{ci}}$, $\overline{w_{bi}}$, $\overline{w_{zi}}$ determined by the cargo holds and ballast tanks capacity, as well as the local strength of the cargo spaces, and act as limiters for technological parameters.

The vessel loading process is thus a vector trajectory $u(t)$ in the space of possible states U . Moreover, the space of states U is n -dimensional with a finite value (constraints on technological parameters) along each dimension.

On the other hand, the loading of a vessel is characterized by its seaworthiness, which can be described by the vector S_u , whose components are the parameters of vessel's draught, trim, stability and strength.

Mean draught T_m , trim t and heel angle θ are important parameters of a vessel's seaworthiness.

The mean draught T_m is a function of the vessel's displacement W of the vessel and the density of the supporting water ρ , i.e.:

$$T_m = f(W, \rho), \quad (2)$$

This dependence is presented in a tabular or graphical form in the 'Information on the stability and strength of the ship' (Loading manual).

The displacement of the vessel W is the sum of the weight of the empty vessel w_0 , the weight of the vessel's stores (fuel, oil, water) w_s , including the weight of equipment, provisions and crew, the weight of cargo w_c and the weight of ballast w_b , and is expressed by the following equation:

$$W = w_0 + w_s + w_c + w_b, \quad (3)$$

The vessel's trim t is determined by the following analytical expression:

$$t = \frac{W(x_G - x_B)}{\overline{M}}, \quad (4)$$

where is:

W – the displacement of the vessel;

x_G, x_B – abscissas of the centre of gravity and the centre of buoyancy, respectively;

\overline{M} – is the moment trimming the vessel by 1 cm.

The difference $x_G - x_B$ represents the shoulder of the pair of forces (i.e. the equal-action forces of weight and support forces) and expresses the distance measured horizontally between the centre of gravity and the centre of buoyancy.

The value of the centre of gravity x_g abscissa is calculated using the formula:

$$x_g = \frac{M_x}{W}, \quad (5)$$

where is:

M_x – is the vessel's static moment of mass relative to the centre of gravity of the waterline plane;

W – the displacement of the vessel.

The static moment of mass of a vessel relative to the centre of gravity of the waterline plane is calculated using a formula which takes into account the components of the moment from an empty vessel, the ship's constant, the ship's reserves, cargo and ballast:

$$M_x = w_0 x_0 + \sum_{i=1}^n w_{st} x_{si} + \sum_{i=1}^n w_{ci} x_{ci} + \sum_{i=1}^n w_{bi} x_{bi}, \quad (6)$$

where is:

w_0 – the weight of the empty vessel;

w_{st} – the amount of ship's stores in the i -th storage space;

w_{ei} – the amount of cargo in the i -th hold;

w_{bi} – the amount of ballast in the i -th tank;

x_0 – the abscissa of the centre of gravity of an empty vessel;

x_{si} – the abscissa of the centre of gravity of the vessel's supplies in the i -th compartment;

x_{ci} – the abscissa of the centre of gravity of the cargo in the i -th hold;

x_{bi} – the abscissa of the centre of gravity of the ballast in the i -th tank;

$i = 1, 2, \dots, n$ – number of cargo spaces, ballast tanks and storage spaces respectively.

The abscissa of the centre of buoyancy x_B is a function of the mean draft, i.e. displacement W and density of the water in which the vessel is situated M :

$$x_B = f(W, \rho), \quad (7)$$

This dependency is usually presented in tabular form in the Loading manual, which is usually prepared by the shipbuilder for each particular vessel.

The value of the moment that trimming the vessel by 1 cm M also depends on the mean draft and is a function of displacement W and density of the water ρ :

$$\bar{M} = f(W, \rho), \quad (8)$$

Ship stability is the ability of a vessel to withstand external forces that disturb its equilibrium and to return to its original equilibrium position when these forces cease to act. It is one of the most important seaworthiness characteristics of a vessel.

The vessel's stability is characterised by the following parameters: initial metacentric height h , the capsizing moment of the ship M_{cap} , maximum righting lever of the static stability curve l_{max} , the angle of the static stability curve maximum θ_{max} , the angle of stability curve vanishing θ_{min} .

The initial metacentric height h is determined by the following expression:

$$h = z_m - z_g + \Delta h, \quad (9)$$

where, z_m and z_g are the applicate of the transverse metacentre and the centre of gravity, respectively;

Δh – correction to the initial metacentric height in the presence of free surfaces of liquid stores and ballast.

The metacentre applicate z_m depends on the mean draft of the vessel. This dependence is expressed in a tabular form in the vessel's documents.

The centre of gravity applicate z_g depends on the static moment of mass M_z relative to the vessel's main plane and displacement and is calculated using the formula:

$$z_g = \frac{M_z}{W}, \quad (10)$$

The value of the static moment M_z is determined by the following expression:

$$M_z = w_0 z_0 + \sum_{i=1}^n w_{si} z_{si} + \sum_{i=1}^n w_{ci} z_{ci} + \sum_{i=1}^n w_{bi} z_{bi}, \quad (11)$$

where,

w_0 – the weight of the empty vessel;

w_{si} – the amount of ship's stores in the i -th storage space;

w_{ci} – the amount of cargo in the i -th hold;

w_{bi} – the amount of ballast in the i -th tank;

z_0 – the applicate of empty ship's centre of gravity;

z_{si} – the applicate of ship's stores in the i -th storage space;

z_{ci} – the applicate of cargo in the i -th hold;

z_{bi} – the applicate of ballast in the i -th tank;

$i = 1, 2, \dots, n$ – number of cargo spaces, ballast tanks and storage spaces respectively.

The parameters characterising stability can be obtained from static and dynamic stability diagrams. The static and dynamic stability curves are plotted along the static stability levers corresponding to certain heel angles of the ship. The static stability levers can be obtained either by means of a universal stability curve or by using Cross Curves of Stability (KN curves) provided in the ship's documentation.

The levers of the static stability curve, as well as the curve itself, depend on the displacement W , the density of the water supporting the vessel ρ and the static moment M_z . The values of the capsizing moment M_{cap} , the angle of the static curve vanishing θ_{min} , the maximum righting lever l_{max} and the corresponding heel angle θ_{max} which can be obtained from the static stability curves, are also functions of displacement, water density and static moment.

The constant heel angle of the ship θ depends mainly on the static moment of the masses relative to the diametrical plane of the vessel M_y , which is given by the following expression.

$$M_y = w_0 y_0 + \sum_{i=1}^n w_{si} y_{si} + \sum_{i=1}^n w_{ci} y_{ci} + \sum_{i=1}^n w_{bi} y_{bi}, \quad (12)$$

where,

w_0 – the weight of the empty vessel;

w_{si} – the amount of ship's stores in the i -th storage space;

w_{ci} – the amount of cargo in the i -th hold;

w_{bi} – the amount of ballast in the i -th tank;

y_0 – the ordinate of the centre of gravity of an empty vessel;

y_{si} – the ordinate of the centre of gravity of ship's stocks in the i -th storage space;

y_{ci} – the ordinate of the centre of gravity of cargo in the i -th hold;

y_{bi} – the ordinate of the centre of gravity of ballast in the i -th tank;

$i = 1, 2, \dots, n$ – number of cargo spaces, ballast tanks and storage spaces respectively.

The following functional dependence of the heel of the vessel can be written down:

$$\theta = f(W, \rho, M_z, M_y), \quad (13)$$

The strength parameters include the shear forces SF_i and bending moments BM_i in the i -th section of the hull resulting from the vessel's loading, and the local strength P_i of the i -th cargo hold.

When calculating the strength of a vessel's hull, the vessel own weight and water support forces acting on the vessel are taken into account. The vessel's weight forces

acting on the hull are represented in the form of two components – the weight forces of the hollow vessel and the weight forces from the loads that constitute the deadweight.

In this case, the bending moments BM_i and shear forces SF_i for each section of the vessel are expressed as the sum of three components:

$$BM_i = BM_0 + BM_w + BM_s, \quad (14)$$

$$SF_i = SF_0 + SF_w + SF_s, \quad (15)$$

where,

BM_i, SF_i – bending moments and shear forces in the i -th section of the vessel;

BM_0, SF_0 – components of bending moment and shearing force from the weight of the empty vessel;

BM_w, SF_w – components of the bending moment and shear force, respectively, from the loads included in the deadweight;

BM_s, SF_s – components of the bending moment and shear force, respectively, due to the action of support forces.

The components of the bending moment and shear force due to the weight of the empty vessel for each monitored section are constant and are given in the ship's documentation. The components of the bending moment and shear force from the loads included in the deadweight are determined by the arrangement of cargo in holds, ballast in tanks and stores in the relevant vessel spaces and tanks, and are calculated in tabular form using elementary relations.

To calculate the components of the shear force and bending moment due to support forces, the vessel's Loading manual contains information in the form of tables or graphs.

The local strength P_i is characterised by the ratio of the amount of cargo received to the area of the cargo space in which the cargo is stored. The ship's documentation specifies the permissible loads per square metre of cargo hold and upper deck.

Thus, the maritime safety vector S_u can be formally expressed as follows:

$$S_u = (T_m, t, \theta, h, M_{cap}, l_{max}, \theta_{max}, \theta_{min}, SF_i, BM_i, P_i). \quad (16)$$

The vector is characterised by a range of permissible values determined by IMO or classification society requirements for the values of the landing, stability and strength parameters.

Ship cargo operations can be considered as an optimisation task. It is necessary to consider the restrictions that may be imposed when setting an optimisation task.

There are two categories of restrictions that apply to the loading of a vessel and the determination of permissible loads. The first category consists of general restrictions that are applicable to all types of vessels and are intended to ensure the seaworthiness of the vessel. The second category consists of specific restrictions that are unique to each type of vessel.

Let's focus on the first category of restrictions, which are designed to ensure the seaworthiness of the vessel. These restrictions mainly concern the draft of the vessel, which includes the mean permissible draft T_m and the permissible limits of its trim t . In most cases, restrictions on the heel θ of the vessel are also included in this category. However, it is common practice for the ship's crew to minimise the heel of the vessel during cargo operations, so separate restrictions for heel may not be necessary.

Limits on the mean permissible draft T_m arise from a number of factors, including the International Load Line Convention, shipbuilders' specifications, current voyage draft limits and the need to maintain minimum necessary forward and aft draughts to avoid slamming or propeller exposure. These considerations impose restrictions on T_m , resulting in limitations on its value.

$$T_{\min} \leq T_m \leq T_{\max}, \quad (17)$$

where T_{\min} та T_{\max} – respective, the lower and upper limits of the mean vessel draft T_m .

The lower limit for a vessel's trim t_{\min} can be set to zero to avoid having a bow trim which would complicate ballast operations and cargo calculations. On the other hand, the upper limit t_{\max} is determined by various factors such as ballast and liquid measurement tables, operational limitations of the ship's equipment and the seaworthiness of the vessel. The limitation on the vessel's trim can be defined as follows:

$$t \in [0, t_{\max}], \quad (18)$$

The limitations that ensure the necessary stability of the vessel are primarily defined by the limitation of the initial metacentric height h , as expressed in equation:

$$h_{\min} \leq h \leq h_{\max}, \quad (19)$$

In this equation h_{\min} and h_{\max} represent the lower and upper limits of the initial metacentric height, respectively. In addition, the minimum value of h_{\min} is determined by the International Maritime Organisation (IMO) requirements for the initial stability of ships.

Several parameters related to vessel stability, such as the capsizing moment of the vessel M_{cap} , the maximum arm of the static stability curve l_{\max} , the angle of heel of the vessel at which the maximum arm occurs θ_{\max} and the angle of vanishing stability θ_{\min} , are derived from the static stability curve. The values of these parameters are also subject to restrictions imposed by the IMO regulations for the initial stability of vessels, denoted as M_{cap}^{imo} , l_{\max}^{imo} , θ_{\max}^{imo} and θ_{\min}^{imo} respectively.

The third set of parameters relates to the overall longitudinal strength of the vessel and is represented by the maximum allowable values of bending moments BM_i and transverse shear forces SF_i for each control section of the vessel.

All the restricted parameters that define the seaworthiness of the vessel T_m , t , h , M_{cap} , l_{\max} , θ_{\max} , θ_{\min} depend on the displacement, the longitudinal static moment M_x and the vertical static moment M_z of the vessel. Consequently, the longitudinal moment M_x is related to the vessel's trim t , bending moments BM_i and shear forces SF_i , while the moment M_z is related to the initial metacentric height h and the characteristics of the static stability curve M_{cap} , l_{\max} , θ_{\max} , θ_{\min} .

Taking into account the prescribed values for t_{\max} , h_{\max} , h_{\min} , M_{cap}^{imo} , l_{\max}^{imo} , θ_{\max}^{imo} , θ_{\min}^{imo} , BM_i , SF_i which express the requirements for the seaworthiness of the vessel, it is possible to determine the limiting values for the displacement of the vessel W_{\max} , the minimum M_x^{\min} and maximum M_x^{\max} longitudinal moments and the upper M_z^{\min} and lower M_z^{\max} limits of the vertical moment.

Let's consider, W , M_x' , M_z' as the displacement and static moments that occur in a selected loading configuration of the vessel. It is clear that certain loading configurations satisfy the following conditions:

$$W' \leq W_{\max}, M'_x \in [M_x^{\min}, M_x^{\max}], M'_z \in [M_z^{\min}, M_z^{\max}], \quad (20)$$

These loading configurations must fall within the range of permissible loads set U based on maritime safety requirements. However, it is important to note that there may be specific restrictions that are unique to a particular type of ship. These restrictions may limit the loading possibilities within the allowable set of options U .

From a maritime safety perspective, it is crucial to consider not only the seaworthiness of a vessel at the final stage of the loading process t_{fin} , but also the current state of the ship at each stage t_{cur} , from the start of loading to its completion. This requires strict adherence to a number of limitations within the system.

$$\begin{aligned} W'(t_{cur}) &\leq W_{\max}, M'_x(t_{cur}) \in [M_x^{\min}, M_x^{\max}], \\ M'_z(t_{cur}) &\in [M_z^{\min}, M_z^{\max}], t_{cur} \in [0, t_{fin}], \end{aligned} \quad (21)$$

where is t_{fin} the moment at which the ship's cargo operations are finished.

When formulating the optimisation problem for cargo operations, it is important to consider additional specific limitations that take into account the unique characteristics of different types of vessels. For example, when dealing with bulk carriers, the following constraints should be considered:

1. The number of port cargo facilities involved in handling the vessel.
2. The number of stages involved in loading and unloading the vessel.
3. The number of holds and ballast tanks used for cargo and ballast operations at each stage.
4. The amount of cargo to be handled for each hold and the amount of ballast required for each tank.
5. Cargo and ballast operations speed variations at each stage.

These limitations, together with the requirements to ensure the seaworthiness of the ship, are essential factors in formulating the optimisation problem.

Conclusions. The article presents a methodology for determining an acceptable range of vessel loads. This approach allows the selection of an optimum strategy for carrying out cargo operations, with the emphasis on maintaining the seaworthiness of the ship at all times. The key objective is to ensure that the ship's seaworthiness parameters, in particular stability, overall longitudinal and local strength, remain within acceptable limits throughout the period of cargo operations. By carefully managing the variations in cargo and ballast, it is possible to achieve continuous compliance with these critical parameters.

BIBLIOGRAPHY

1. H. J. Pursey. Merchant ship construction. Glasgow, Brown, Son and Ferguson Ltd. 2007. P. 72–77.
2. David Peel. A guide to bulk carrier operations. The Nautical Institute, London. 2020. P. 15–24.
3. I.C. Clark. The management of merchant ship stability, trim & strength. The Nautical Institute of London. 2011. P. 266–270.
4. SOLAS – International Convention for the Safety of Life at Sea. Consolidated Edition, IMO, London, 2014.

5. Load Lines. 2005 Consolidated Edition, 3-rd Edition. IMO. London, 2016.
6. Code of practice for the safe loading and unloading of bulk carriers (BLU Code). IMO. London, 1998.
7. The International Maritime Solid Bulk Cargoes (IMSBC). Edition. IMO, London, 2018.
8. Mark Rowbotham. Break bulk and cargo management. Lloyd's practical shipping guides. Routledge and CRC Press. 2022. P. 22–24.
9. Capt. Jack Isbester. Bulk carrier practice. (2nd ed.). The Nautical Institute, London. 2010. P. 168–169.
10. David J Eyres, G. J. Bruce. Ship Construction. (7th ed.). Butterworth-Heinemann, Oxford. 2012. P. 363–370.
11. David House. Cargo work for maritime operations. (7th ed.). Butterworth Heinemann. Amsterdam. 2005. P. 100–126.
12. Гайченя А.В. Аналітичний опис завантаження судна за допомогою методів дослідження операцій. *Науковий збірник «Судноводіння»*. 2017. Вип. 42. С. 77–85.
13. Кліменко Е.Н. Система автимагнізованого контролю вантажних операцій балкера. *Науковий збірник «Судноводіння»*. 2014, Вип. 24. С. 84–92.
14. Цимбал Н.Н., Васьков Ю.Ю. Формування оптимізаційного завдання проведення вантажних операцій навалювальних суден. *Науковий збірник «Судноводіння»*. 2004. Вип. 7. С. 3–10.
15. Цимбал Н.Н., Васьков Ю.Ю. Вибір оптимального варіанту проведення вантажних операцій навалювальних суден. *Науковий збірник «Судноводіння»*. 2005. Вип. 9. С. 68–74.
16. Цимбал Н.Н. Спосіб формування етапів вантажних операцій навалювальних суден при нетипових завантаженнях. *Методи та засоби управління розвитком транспортних систем*. 2005. Вип. 9. С. 160–168.

REFERENCES

1. H. J. Pursey. (2007). *Merchant ship construction*. Glasgow, Brown, Son and Ferguson Ltd., 72-77.
2. David Peel. (2020). *A guide to bulk carrier operations*. The Nautical Institute, London, 15-24.
3. I.C. Clark (2011). *The management of merchant ship stability, trim & strength*. The Nautical Institute of London. 266-270.
4. SOLAS – International Convention for the Safety of Life at Sea. Consolidated Edition. 2014, IMO, London, 2014.
5. Load Lines. 2005 Consolidated Edition, 3-rd Edition. IMO. London, 2016.
6. Code of practice for the safe loading and unloading of bulk carriers (BLU Code). IMO. London, 1998.
7. The International Maritime Solid Bulk Cargoes (IMSBC). 2018 Edition. IMO, London, 2018.
8. Mark Rowbotham. (2022). *Break bulk and cargo management. Lloyd's practical shipping guides*. Routledge and CRC Press. 22-24.

9. Capt. Jack Isbester. (2010). *Bulk carrier practice*. (2nd ed.). The Nautical Institute, London, 168-169.
10. David J Eyres, G. J. Bruce. (2012). *Ship Construction*. (7th ed.). Butterworth-Heinemann, Oxford, 363-370.
11. David House. (2005). *Cargo work for maritime operations*. (7th ed.). Butterworth Heinemann. Amsterdam, 100-126.
12. Gaychenya A. V. (2017). Analitychniy opys zavantagennya sudna za dopomogou metodiv doslidgennya operaciy. [Analytical description of the vessel loading by methods of operations research]. *Naukoviy zbirnyk 'Sudnovodinnya' [Research journal 'Shipping and Navigation']*, 42, Odessa, ONMA, 77-85. (In Ukrainian).
13. Klymenko E.N. (2014). Sistema avtomatyzovanogo kontrolyu vantagnyh operaciy balkera [Bulk carrier's cargo operations automatic control system]. *Naukoviy zbirnyk 'Sudnovodinnya' [Research journal 'Shipping and Navigation']* 24, Odessa, ONMA, 84-92. (In Ukrainian).
14. Tsymbal N. N., Vaskov Y. Y. (2004). Formuvannya optimizaciynogo zavdannya provedennya vantagnih operaciy navaluvalnih suden. [Formation of the optimization task of carrying out the loading operations of bulk carriers]. *Naukoviy zbirnyk 'Sudnovodinnya' [Research journal 'Shipping and Navigation']*, 7, Odessa, ONMA, 3-10. (In Ukrainian).
15. Tsymbal N. N., Vaskov Y. Y. (2005). Vybir optymalnogo variantu provedennya vantagnyh operaciy navaluvalnyh suden. [Selection of the best option of cargo operations handling for bulk carriers]. *Naukoviy zbirnyk 'Sudnovodinnya' [Research journal 'Shipping and Navigation']* 9, Odessa, ONMA, 68-74. (In Ukrainian).
16. Tsymbal N. N. (2005). Sposib formuvannya etapiv vantagnyh operaciy navalyuvalnyh suden pry netyprovnyh zavantagennyah. [The method of forming of the cargo operations stages of bulk carriers at non-standard loads]. *Metody ta zasoby upravlinnya rozvitkom transportnih system*. № 9, 160-168. (In Ukrainian).

МЕТОДИ КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖНИХ СУДЕН

А.І. Головань

к.т.н., доцент кафедри судноводіння і морської безпеки,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-6589-4381

Анотація

Сучасні засоби водного транспорту, незалежно від їх призначення, характеризуються складністю та надмірністю суднових технічних засобів, що ускладнює системи технічного обслуговування суден. Тому стає суттєвим використання надійних методів оцінки ефективності систем технічного обслуговування. У статті розглянуто перспективні методи кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден з метою розроблення ефективних алгоритмів та програм для оцінки і підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. Проведений аналіз вказує на недостатність універсальності наявних методів кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. **Метою** статті є синтез огляду методів кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден та виклад основних підходів, що становлять основу дослідження систем технічного обслуговування для цих суден і суднових технічних засобів. **Результати.** Проаналізовано сучасні методи оцінки ефективності технічного обслуговування вантажних суден, розглянуто переваги і недоліки наявних методів, врахування яких дозволить розробляти ефективні алгоритми та програми для оцінки і підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, зокрема використовуючи інтелектуальні консультативні системи. **Висновки.** Для успішної кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден потрібно врахувати такі аспекти: доступність та якість даних, вибір відповідного методу оцінки, розуміння системи технічного обслуговування, використання відповідних інструментів та технологій, аналіз та інтерпретація результатів. Успішна кількісна оцінка ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден може сприяти досягненню сталого розвитку сфери водного транспорту та зміцненню позицій українського судноплавства на світовому ринку перевезень такими способами, як: підвищення ефективності, зменшення впливу на навколишнє середовище, покращення репутації, зниження витрат, забезпечення безпеки. Надійні системи технічного обслуговування можуть забезпечити безпеку суден та екіпажу, що є важливим фактором для сталого розвитку сфери водного транспорту.

Ключові слова: кількісна оцінка, ефективність, технічне обслуговування, вантажні судна, водний транспорт, безпека судноплавства, інтелектуально-консультативні системи.

METHODS FOR QUANTIFYING THE EFFICIENCY
OF CARGO SHIP MAINTENANCE SYSTEMS

A.I. Golovan

Ph.D. (Engineering), Associate Professor at the Department of Navigation
and Maritime Safety,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-6589-4381

Summary

Modern means of water transport, regardless of their purpose, are characterized by the complexity and redundancy of shipboard machinery, which in turn complicates ship maintenance systems. Therefore, it becomes essential to use reliable methods for assessing the effectiveness of maintenance systems. The article considers promising methods for quantifying the effectiveness of cargo ship maintenance systems to develop effective algorithms and programs for assessing and improving the effectiveness of cargo ship maintenance systems. The analysis shows a lack of universality of existing methods for quantifying the efficiency of cargo ship maintenance systems. **The purpose** of the article is to synthesize a review of existing methods for quantifying the efficiency of cargo ship maintenance systems and to present the main approaches that form the basis for the study of maintenance systems for these ships and ship equipment. **Results.** Modern methods for assessing the efficiency of cargo ship maintenance are analyzed, the advantages and disadvantages of existing methods are considered, the consideration of which will allow the development of effective algorithms and programs for assessing and improving the efficiency of cargo ship maintenance systems, using intelligent advisory systems. **Conclusions.** For a successful quantitative assessment of the efficiency of cargo ship maintenance systems, the following aspects should be considered: data availability and quality, selection of an appropriate assessment method, understanding of the maintenance system, use of appropriate tools and technologies, analysis and interpretation of the results. A successful quantitative assessment of the efficiency of cargo ship maintenance systems can contribute to the sustainable development of the water transport sector and strengthen the position of Ukrainian shipping in the global transportation market in the following ways: increased efficiency, reduced environmental impact, improved reputation, reduced costs, and safety. Reliable maintenance systems can ensure the safety of vessels and crew, which is an important factor for the sustainable development of the water transport sector.

Key words: quantitative assessment, efficiency, maintenance, cargo ships, water transport, navigation safety, intelligent advisory systems.

Вступ. Кількісна оцінка ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден передбачає визначення їх умовних показників ефективності $P_i(t)$, що відображають ефективність системи в кожному її стані (i). Для здійснення кількісної оцінки рівнів ефективності такої системи можна використовувати декілька методів різного ступеня складності і вірогідності. Серед них зазначаються аналітична оцінка, статистична оцінка, експертне опитування та апроксимація рівня ефективності технічного обслуговування.

Вибір конкретного методу залежить від особливостей застосування системи технічного обслуговування вантажних суден, можливості одержання вхідних даних і необхідної вірогідності оцінок. Наприклад, аналітична оцінка може бути застосована, якщо вдається сформулювати аналітичні моделі, що описують взаємодію компонентів системи технічного обслуговування та їх вплив на ефективність. Статистична оцінка може бути використана, якщо доступні достатньо об'ємні і достовірні статистичні дані про функціонування системи.

Експертне опитування може бути корисним, коли здобути інформацію важко або неможливо через обмеження збору даних, і можуть залучитися експерти з великим досвідом. Апроксимація рівня ефективності технічного обслуговування використовується у випадках, коли точне оцінювання недоцільне, і можна використовувати спрощені моделі або наближені значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стаття ґрунтується на дослідженнях сучасних методів кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, а також аналізі стану питання з оцінки і управління ефективністю систем технічного обслуговування [1–12]. Проаналізовано основні методи кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, що застосовуються на сучасному етапі, а також розглянуто підходи до узгодження кількісних показників ефективності та вибору раціональної повноти контролю технічного стану технічних засобів вантажних суден. Проведений аналіз вказує на недостатність універсальності наявних методів кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден.

Постановка проблеми. У сучасному судноплаванні ефективність систем технічного обслуговування вантажних суден відіграє критичну роль у забезпеченні безперебійної роботи та надійності суден. Однак відсутність чіткого підходу до кількісної оцінки такої ефективності ускладнює процеси прийняття рішень та управління системами обслуговування. Хоча існує декілька методів для оцінки ефективності, вибір оптимального методу, який враховує особливості конкретної системи обслуговування, стає викликом. Тому необхідно дослідити сучасні методи оцінки, аналізувати їх переваги та обмеження, а також розробити узагальнений підхід до кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден.

Формулювання цілей статті. Метою статті є синтез огляду наявних методів кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден та виклад основних підходів, що становлять основу дослідження систем технічного обслуговування для цих суден і судових технічних засобів. Суттєва увага приділяється перевагам і недолікам наявних методів, врахування яких дозволить розробляти ефективні алгоритми та програми для оцінки і підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, зокрема використовуючи інтелектуальні консультативні системи.

Виклад основного матеріалу. *Метод аналітичної оцінки* є важливим підходом для визначення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. Процес функціонування такої системи, спрямованої на досягнення визначених цілей, характеризується значеннями параметрів у кожному її стані (i). Ці параметри мають свою номенклатуру і кількість, залежні від способу вирішення

задачі, тобто від конкретного стану системи. Для кожного параметра системи технічного обслуговування вантажного судна встановлюють припустимі області. Знаходження параметрів в цих областях свідчить про працездатність системи, а це означає, що система функціонує з необхідною ефективністю.

Цей підхід до оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден є основоположним, оскільки він дозволяє аналітично враховувати вплив більшості експлуатаційних факторів. Застосування методу аналітичної оцінки дає змогу ретельно розглядати взаємозв'язки між параметрами системи і вивчати їх вплив на функціонування системи технічного обслуговування. Відповідність параметрів припустимим областям забезпечує надійність і ефективність системи в процесі технічного обслуговування вантажних суден.

Метод статистичної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден базується на спостереженнях або експлуатаційних випробуваннях цих систем. Під час спостереження отримують числові значення $\beta(m)$, які характеризують результат визначеної операції системи технічного обслуговування вантажного судна:

$$\beta(m) = \begin{cases} 1, & \text{за умови виконання задачі} \\ 0, & \text{за умови невиконання задачі} \end{cases}, \quad (1)$$

де $m = \overline{1, M}$ – номер періоду експлуатації, який розглянуто.

По результатам спостережень формується ряд значень $\beta(1), \dots, \beta(m)$ за формулою (1). Середнє значення цих величин обчислюється за формулою (2).

$$\bar{\beta} = M^{-1} \cdot \sum_{m=1}^M \beta(m) = \frac{n}{M}. \quad (2)$$

Оцінка ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна зводиться до визначення ймовірності виконання задачі P за допомогою статистичної оцінки P^* , яка обчислюється за формулою (2), де n – кількість випадків успішного виконання задачі.

При збільшенні числа спостережень ($n \rightarrow \infty$) оцінка P^* збігається з дійсним значенням ймовірності P . При малій кількості розглянутих періодів формула (2) дає лише деякі придатні оцінки умовної ефективності, для яких повинні визначатися довірчі інтервали [2].

Крім того, за допомогою формул математичної статистики може бути визначено необхідне число періодів (M), яке необхідно розглянути для забезпечення необхідної точності оцінок ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден.

Результатом таких спостережень є ряд значень (x_m) вихідного (узагальнюючого) параметра системи технічного обслуговування (x) вантажного судна. За допомогою цих спостережень визначаються статистичні характеристики ефективності системи (формули 3, 4) [2]:

$$m_x^* = M^{-1} \cdot \sum_{m=1}^M x_m \quad (3)$$

$$\sigma_x^* = \sqrt{(M-1)^{-1} \cdot \sum_{m=1}^M x_m^2 - (m_x^*)^2} \quad (4)$$

Ці статистичні характеристики дозволяють оцінити ефективність системи технічного обслуговування вантажного судна та зробити висновки про її продуктивність та надійність. Здійснюючи аналіз результатів спостережень та обчислення статистичних параметрів, можна здійснити оцінку важливих характеристик системи технічного обслуговування, що є значущим у реалізації ефективної стратегії обслуговування вантажних суден.

У випадку, коли відома функція ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна $E(x)$, показник ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна знаходиться як середнє значення вихідного параметра системи (x_m) за результатами спостережень:

$$P^* = M^{-1} \cdot \sum_{m=1}^M E(x_m), \quad (5)$$

де x_m – значення вихідного параметра системи в спостереженні (m).

Метод експертного опитування є одним із підходів, який використовується для оцінки ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден. Цей метод включає в себе декілька кроків, які можуть бути виконані для отримання експертних оцінок.

По-перше, необхідно визначити групу експертів, які мають достатні знання і досвід в галузі технічного обслуговування вантажних суден. Ця група експертів повинна бути представлена особами, які мають фахові знання про функціонування судових технічних систем і комплексів. При цьому необхідно забезпечити незалежність висновків експертів.

По-друге, екпертам слід надати докладну інформацію про систему технічного обслуговування вантажного судна, включаючи його параметри, функціональні вимоги та умови експлуатації. Це допоможе екпертам краще розуміти характеристики системи і зробити обґрунтовані оцінки ефективності. Складається таблиця експертного опитування, яку повинні заповнити експерти. Даються пояснення до неї, що вказують, як треба заповнювати таблицю і які при цьому враховувати фактори.

По-третє, експерти повинні визначити критерії оцінки ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна. Ці критерії можуть включати різні аспекти функціонування системи, такі як надійність, доступність, швидкість реакції на збої тощо.

По-четверте, експерти мають надати свої оцінки кожного з визначених критеріїв для системи технічного обслуговування вантажного судна. Це може бути зроблено за допомогою шкали оцінювання або числових значень, що відповідають рівню ефективності. Експерти заповнюють таблицю опитування, проставляючи кожному способу (s) рішення задачі ($s = \overline{1}, \overline{S}$) оцінки (G_s) в балах (наприклад, за стобальною шкалою). Один з (S) можливих способів рішення задачі приймається за базовий. Базовому показнику призначається деяке значення ($P_B < 1$) і дається найвища оцінка в балах (P_B).

По-п'яте, зібрані експертні оцінки піддаються аналізу та обробці. Можуть бути використані методи статистичного аналізу для визначення середніх значень оцінок, ступеня узгодженості між екпертами та інших характеристик оцінок. Виконується статистична обробка результатів опитування:

1) за даними опитування кожного (g) експерта ($g = (\overline{1, G})$) знаходяться показники ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна для кожного (s) способу рішення задачі:

$$P_{sg} = \frac{P_{Bg} R_{sg}}{R_{Bg}}; \quad (6)$$

2) розраховуються середні статистичні значення показників ефективності, розрахованих за формулою (6):

$$\bar{P}_s = G^{-1} \sum_{g=1}^G P_{sg}; \quad (7)$$

3) оцінюється ступінь надійності отриманих результатів (7) варіацією:

$$\gamma_s = \bar{P}_s^{-1} \sqrt{(G-1)^{-1} \cdot \sum_{g=1}^G (P_{sg} - \bar{P}_s)^2}. \quad (8)$$

За формулою (8) розраховується варіація, яка є мірою розкиду експертних оцінок і вказує на ступінь збіжності думок експертів щодо оцінюваної системи технічного обслуговування вантажного судна. Вважається, що варіація, що обчислюється за цією формулою, є задовільною, якщо вона менше 0.3 ($\gamma_s < 0.3$), і доброю, якщо вона менше 0.2 ($\gamma_s < 0.2$) [2].

У разі наявності досвіду експлуатації аналогічних систем технічного обслуговування вантажних суден, то як вагові коефіцієнти (R_{sg} , R_{Bg}) у формулі (6) можна підставляти відомі «ваги» характеристик ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, які вже знаходяться в експлуатації.

За умови, що яка-небудь з варіацій $\gamma_s > 0.3$, то результат оцінки (7) є незадовільним. В такому разі доцільно виявити причини ненадійності оцінок. Для виявлення експертних оцінок, які знижують надійність, необхідно виключити кожного (g) з (G) експертів по черзі і обчислити для експертів, що залишилися, за формулою (8) нові значення варіації (γ_s'). Якщо при виключенні оцінок, наданих експертом з номером (g), значення (γ_s') виявиться суттєво менше значення (γ_s), то це буде значити, що оцінки експерта за номером (g) викликають погане узгодження оцінок. Така процедура може повторюватися кілька разів.

Важливо враховувати, що навіть при майже повній узгодженості експертних оцінок ($\gamma_s \rightarrow 0$), результати опитування не можна вважати абсолютно достовірними. Це пояснюється тим, що навіть якщо більшість експертів збігаються у своїх оцінках, це не завжди означає, що їхнє рішення є правильними. Можливо, всі експерти можуть помилятися або надавати невірні оцінки з однієї і тієї ж причини.

Тому використання експертних оцінок слід розглядати як додатковий джерело інформації і використовувати їх лише в тому разі, коли неможливо отримати рішення більш об'єктивними методами. Наприклад, якщо інші методи оцінки ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден не є доступними або не можуть бути застосовані через обмеження вхідних даних чи складність моделювання.

При використанні експертних оцінок слід бути обережним і враховувати можливі ризики асоційовані зі суб'єктивністю експертних думок. Для забезпечення

більш об'єктивних та достовірних результатів рекомендується комбінувати експертні оцінки з іншими методами та джерелами даних. Крім того, варто звертатися до експертів з відповідною експертною кваліфікацією і досвідом у відповідній галузі, щоб знизити вплив можливих помилок та забезпечити більш об'єктивний аналіз та рішення.

Метод апроксимації рівня ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна заснований на оцінці множини показників (P_i), що характеризують ефективність системи. Ці показники можуть бути ранжовані таким чином, щоб вони залежали від номера способу рішення цільової задачі. Навіть якщо на практиці відома лише частина з показників ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна, можна побудувати аналітичну залежність $P = (P_i)$, яка відображає вплив різних способів рішення задачі (i) на показник ефективності системи.

Залежність $P(i)$ може бути побудована, наприклад, за допомогою методу найменших квадратів [3]. Цей метод дозволяє знайти оптимальну апроксимацію залежності $P(i)$ на основі доступних даних про ефективність системи. Шляхом використання методу найменших квадратів можна отримати аналітичний вираз для $P(i)$, який дозволить здійснити оцінку невідомих показників ефективності системи за допомогою доступних даних. Наприклад, за допомогою аналітичної залежності $P_m = (P_m)$ можна знайти значення P_m , які відповідають способам рішення задачі з номером (i).

Цей метод дозволяє зробити апроксимацію ефективності системи на основі доступних даних і знаходити невідомі показники ефективності рішення задачі. Однак слід зазначити, що точність апроксимації залежить від кількості доступних даних та точності оцінювання. Тому при застосуванні цього методу необхідно уважно аналізувати його результати та враховувати можливу похибку, пов'язану з обмеженим обсягом даних.

Окрім основних принципів дослідження ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден і судових технічних систем і комплексів, необхідно враховувати складний характер зміни інтенсивностей відмов і пошкоджень їхніх комплектуючих за напрацюванням.

Врахування динаміки інтенсивності відмов та пошкоджень їхніх комплектуючих є суттєвою складовою при дослідженні ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден та судових технічних систем і комплексів. Зміна інтенсивності може відбуватися на різних етапах експлуатації, що потребує докладного аналізу для забезпечення надійного і оптимального технічного обслуговування.

Важливо розглядати істотні фактори, які впливають на зміну інтенсивності відмов і пошкоджень комплектуючих залежно від їхнього напрацювання. Такий підхід дозволить здійснювати більш точну і адаптивну оцінку ефективності систем технічного обслуговування, збільшуючи їхню надійність та ефективність в довгостроковій перспективі.

Для аналізу складності зміни інтенсивності відмов і пошкоджень комплектуючих можуть використовуватися різні методи та математичні моделі, які дозволяють прогнозувати тенденції змін у майбутньому. Важливо відзначити, що такі дослідження вимагають надійних технічних даних та аналізу статистичних даних

з довгострокового періоду, що дозволить зробити обґрунтовані висновки і рекомендації щодо оптимізації технічного обслуговування.

Отже, ураховуючи складний характер зміни інтенсивності відмов і пошкоджень комплектуючих залежно від напрацювання, дослідження ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден та суднових технічних систем і комплексів має бути виконано з урахуванням комплексного підходу та математичного моделювання для забезпечення надійності та оптимальності процесів обслуговування.

У сучасному контексті експлуатації вантажних суден виявляється троїста класифікація граничних станів суднових технічних засобів, як це визначено в джерелах [4; 5]:

1. Граничний стан, обумовлений допустимим напрацюванням (ресурсом).
2. Граничний стан, що корелює з невиконанням своїх функцій (відмовою).
3. Граничний стан, що відповідає стану перед відмовою.

Ці категорії граничних станів становлять основу для трьох відповідних методів технічної експлуатації:

1. ТЕР – експлуатація на основі ресурсу – з відновленням або списанням після вироблення ресурсу.
2. ТЕВ – експлуатація до відмови – з відновленням або списанням після відмови;
3. ТЕП – експлуатація до стану перед відмовою – з відновленням при досягненні стану перед відмовою.

Методи технічної експлуатації до моменту відмови і до стану перед відмовою відносяться до категорії методів технічної експлуатації за станом. На сучасних вантажних суднах, починаючи з 2020 року закладки, за цими методами експлуатується близько 90% суднових технічних засобів [6]. Це зумовлено суттєвим збільшенням частки радіоелектронного і побутового обладнання в загальній номенклатурі технічних засобів цих вантажних суден, яке добре пристосовано до експлуатації за станом. При більш детальному аналізі методів експлуатації технічних засобів цих вантажних суден їхні системи технічного обслуговування треба віднести до комбінованих (комплексних). В рамках такої системи технічного обслуговування метод технічної експлуатації змінюється залежно від специфічних умов експлуатації конкретного екземпляра вантажного судна.

Широке впровадження методів експлуатації за станом дозволило провідним судноплавним компаніям світу уникнути зростання частки витрат на технічне обслуговування в загальних витратах на експлуатацію вантажних суден і знизити її до приблизно 15% у 2020 році у порівнянні з 2000 роком [6].

Висновки. Враховуючи викладене, можна зробити такі висновки:

- 1) кількісна оцінка ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден вимагає визначення умовних показників ефективності, які відображають ефективність системи в кожному її стані;
- 2) вибір конкретного методу оцінки залежить від особливостей застосування системи, можливості отримання вхідних даних і необхідної вірогідності оцінок;
- 3) методи оцінки включають аналітичну оцінку, статистичну оцінку, експертне опитування та апроксимацію рівня ефективності;

4) під час дослідження методів кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден важливо враховувати необхідну точність, обсяг і доступність даних, а також специфічні особливості системи;

5) методологія, описана в статті, може бути застосована не тільки для систем технічного обслуговування вантажних суден, але й для інших видів суден або технічних систем, де потрібна оцінка ефективності;

6) описані методи можуть бути використані для розробки інтелектуальних консультативних систем, які допоможуть в оцінці та підвищенні ефективності систем технічного обслуговування;

7) з розвитком технологій та збільшенням доступності даних методи, описані в статті, можуть надати більш точні та надійні оцінки ефективності систем технічного обслуговування;

8) описані методи можуть бути інтегровані з іншими методами аналізу даних та прогнозування для створення більш ефективних систем оцінки;

9) методологія, описана в статті, може бути використана в академічних та навчальних цілях для викладання студентам принципів оцінки ефективності систем технічного обслуговування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Alhouli, Y. (2011). Development of Ship Maintenance Performance Measurement Framework to Assess the Decision Making Process to Optimise in Ship Maintenance Planning. In *[Thesis]. Manchester, UK: The University of Manchester; 2011*. URL: <https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.532215>.
2. Mathematical Statistics with Applications in R. (2021). In *Elsevier eBooks*. URL: <https://doi.org/10.1016/c2018-0-02285-9>.
3. Ramachandran, B., & Lau, K. (1991). Functional equations in probability theory. In *Elsevier eBooks*. URL: <https://doi.org/10.1016/c2013-0-11048-3>.
4. Thoft-Christensen, P. (1992). Reliability and optimization of structural systems '91. In *Springer eBooks*. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-84753-0>.
5. Grabski, F. (2015). Semi-Markov Processes: Applications in System Reliability and Maintenance. In *Elsevier eBooks*. Elsevier BV. URL: <https://doi.org/10.1016/c2013-0-14260-2>.
6. Karatuğ, A., & Arslanoğlu, Y. (2022). Development of condition-based maintenance strategy for fault diagnosis for ship engine systems. *Ocean Engineering*, 256, 111515. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111515>.
7. Nikolaidis, E., Ghiocel, D. M., & Singhal, S. (2007). Reliability Assessment of Ships. *Engineering design reliability applications: For the Aerospace, Automotive and Ship Industries*. CRC Press.
8. Vamvoudakis, K. G., & Jagannathan, S. (2016). *Control of complex systems*. URL: <https://doi.org/10.1016/c2015-0-02422-4>.
9. Designing and managing complex systems. (2023). In *Elsevier eBooks*. URL: <https://doi.org/10.1016/c2020-0-03424-9>.
10. Park, J., & Oh, J. (2022). Analysis of collected data and establishment of an abnormal data detection algorithm using principal component analysis and

- K-Nearest neighbors for predictive maintenance of ship propulsion engine. *Processes*, 10(11), 2392. URL: <https://doi.org/10.3390/pr10112392>.
11. Hollnagel, E. (1998). Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM): Qualitative Performance Prediction. In Elsevier eBooks (pp. 216–233). Elsevier BV. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-008042848-2/50008-7>.
 12. Daya, A., & Lazakis, I. (2023). Developing an advanced reliability analysis framework for marine systems operations and maintenance. *Ocean Engineering*, 272, 113766. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113766>.

REFERENCES

1. Alhouli, Y. (2011). Development of Ship Maintenance Performance Measurement Framework to Assess the Decision Making Process to Optimise in Ship Maintenance Planning. In *[Thesis]. Manchester, UK: The University of Manchester; 2011*. <https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.532215>
2. Mathematical Statistics with Applications in R. (2021). In *Elsevier eBooks*. <https://doi.org/10.1016/c2018-0-02285-9>
3. Ramachandran, B., & Lau, K. (1991). Functional equations in probability theory. In *Elsevier eBooks*. <https://doi.org/10.1016/c2013-0-11048-3>
4. Thoft-Christensen, P. (1992). Reliability and optimization of structural systems '91. In *Springer eBooks*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-84753-0>
5. Grabski, F. (2015). Semi-Markov Processes: Applications in System Reliability and Maintenance. In Elsevier eBooks. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/c2013-0-14260-2>
6. Karatuğ, A., & Arslanoğlu, Y. (2022). Development of condition-based maintenance strategy for fault diagnosis for ship engine systems. *Ocean Engineering*, 256, 111515. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111515>
7. Nikolaidis, E., Ghiocel, D. M., & Singhal, S. (2007). Reliability Assessment of Ships. *Engineering design reliability applications: For the Aerospace, Automotive and Ship Industries*. CRC Press.
8. Vamvoudakis, K. G., & Jagannathan, S. (2016). *Control of complex systems*. <https://doi.org/10.1016/c2015-0-02422-4>
9. Designing and managing complex systems. (2023). In *Elsevier eBooks*. <https://doi.org/10.1016/c2020-0-03424-9>
10. Park, J., & Oh, J. (2022). Analysis of collected data and establishment of an abnormal data detection algorithm using principal component analysis and K-Nearest neighbors for predictive maintenance of ship propulsion engine. *Processes*, 10(11), 2392. <https://doi.org/10.3390/pr10112392>
11. Hollnagel, E. (1998). Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM): Qualitative Performance Prediction. In Elsevier eBooks (pp. 216–233). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-008042848-2/50008-7>
12. Daya, A., & Lazakis, I. (2023). Developing an advanced reliability analysis framework for marine systems operations and maintenance. *Ocean Engineering*, 272, 113766. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113766>

ВИКОНАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ ШВАРТОВНИХ ОПЕРАЦІЙ МІЖ СУДНАМИ: ДОСЛІДЖЕННЯ КІБЕРБЕЗПЕКИ

І.П. Гончарук¹, А.І. Головань²

¹к.т.н., доцент кафедри судноводіння і морської безпеки,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-5306-4206

²к.т.н., доцент кафедри судноводіння і морської безпеки,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-6589-4381

Анотація

Ця наукова стаття зосереджена на вивченні кібербезпеки в контексті автоматизованих швартовних операцій між суднами, які відомі як 'ship to ship docking' (STS). З розвитком технологій та автоматизації в морській галузі ці операції стають все більш поширеними і вразливими перед кібератаками та зловмисними діями. Кібербезпека є актуальним питанням у сучасному морському транспорті, зокрема при здійсненні автоматизованих швартовних операцій між суднами. Ці операції повинні виконуватися за допомогою спеціальних автоматизованих систем, які забезпечують точність та безпеку маневрування суден. Проте, разом з перевагами, ці системи також стають вразливими перед кібератаками та зловмисними діями. Операції STS вимагають великих обсягів обміну даними та комунікаційних протоколів між суднами. Під час цих операцій можуть виникнути потенційні ризики кібератак, таких як несанкціонований доступ, перехоплення даних, вплив на керування та навіть можливість виникнення аварійних ситуацій. Отже, основна мета цієї наукової статті полягає в дослідженні кібербезпеки при виконанні автоматизованих швартовних операцій між суднами. Під час досягнення поставленої мети було проаналізовано загрози та ризики, пов'язані з цими операціями, а також розроблено та впроваджено заходи забезпечення кібербезпеки для зменшення ризиків кібератак, забезпечення надійності систем керування та безпеки під час виконання операцій STS. Дослідження, що викладені в даній статті, мають на меті покращити розуміння проблеми кібербезпеки в контексті автоматизованих швартовних операцій між суднами та сприяти розробці ефективних стратегій та політик забезпечення безпеки в цій галузі.

Результати. У цій статті автори представили технологію децентралізованого управління як інструмент для зберігання значного обсягу інформації на борту суден для наукових цілей і заходів із запобігання аварій та інцидентів при виконанні швартовних операцій. **Висновки.** Обґрунтуванням використання технології децентралізованого управління є вирішення майбутніх труднощів, пов'язаних із впровадженням або прийняттям новітніх технологій судноплавними компаніями. Ключовим викликом у цій галузі є заохочення судноплавних компаній до впровадження блокчейну (технологія розподіленого реєстру).

Ключові слова: кібербезпека, загрози, ризики, вразливості, швартовні операції, Ship to ship.

AUTOMATED SHIP TO SHIP DOCKING: A CYBERSECURITY STUDY

I.P. Honcharuk¹, A.I. Golovan²

¹Ph.D (Engineering), Associate Professor at the Department of Navigation and Maritime Safety,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID: 0000-0002-5306-4206

²Ph.D (Engineering), Associate Professor at the Department of Navigation and Maritime Safety,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-6589-4381

Summary

*This research article focuses on the study of cybersecurity in the context of automated mooring operations between ships, known as ship to ship docking (STS). With the development of technology and automation in the maritime industry, these operations are becoming increasingly common and vulnerable to cyberattacks and malicious acts. Cybersecurity is an urgent issue in modern maritime transport, when performing automated ship to ship docking. These operations must be performed using special automated systems that ensure the accuracy and safety of ship maneuvering. However, along with their advantages, these systems also become vulnerable to cyberattacks and malicious acts. STS operations require large amounts of data exchange and communication protocols between ships. During these operations, potential risks of cyberattacks may arise, such as unauthorized access, data interception, impact on control, and even the possibility of accidents. Therefore, the main **purpose** of this scientific paper is to study cybersecurity in automated mooring operations between ships. To achieve this goal, the threats and risks associated with these operations have been analyzed, and cybersecurity measures have been developed and implemented to reduce the risk of cyberattacks, ensure the reliability of control systems, and ensure safety during STS operations. The research presented in this article aims to improve the understanding of cybersecurity in the context of automated ship-to-shore mooring operations and to contribute to the development of effective security strategies and policies in this area. **Results.** In this article, the authors presented distributed control technology as a tool to store a significant amount of information on board ships for scientific purposes and to prevent accidents and incidents during mooring operations. **Conclusions.** The rationale for the use of decentralized management technology is to address future difficulties associated with the introduction or adoption of new technologies by shipping companies. The key challenge in this area is to encourage shipping companies to adopt blockchain (distributed ledger technology).*

Key words: cybersecurity, threats, risks, vulnerabilities, mooring operations, Ship to ship.

Вступ. Ефективне та сталє судноплавство є важливим для безперервного зростання світової економіки, але рівною мірою має бути спрямоване на захист навколишнього середовища, економічну ефективність та забезпечення енергоефективного та безпечного транспортування товарів по всьому світу [1]. Незважаючи на значний прогрес в інноваційних рішеннях для діджиталізації суден, все ще існує

залежність від людських ресурсів з точки зору управління судном, контролю робочих процесів та відповідальності за перевірку роботи на борту судна. Крім того, важливо зазначити, що судноплавство і морський транспорт можуть спричинити велику кількість аварій і інцидентів під час виконання швартовних операцій [2].

Постановка проблеми. Судна, порти та морські об'єкти все більше залежать від сучасних інформаційних та операційних технологій. Кіберінциденти на суднах можуть спричинити збої в роботі критично важливих систем, що створюють проблеми для безпечної експлуатації судна. Тому судовласники повинні бути готові протистояти зростаючим кіберзагрозам. Для того, щоб запобігти кіберінцидентам на суднах і в компаніях, необхідно вжити заходів на рівні керівництва.

У автоматизованих швартовних операціях STS існують різноманітні ризики та загрози кібербезпеки, які можуть мати серйозні наслідки для безпеки та ефективності цих операцій. Ось деякі з них:

1. Кібератаки: зловмисники можуть спробувати зламати системи автоматизації, що керують швартовними операціями, з метою незаконного доступу, розкриття конфіденційної інформації або навіть зміни параметрів операцій.

2. Віруси та шкідливі програми: швартовні системи можуть стати жертвами вірусів, шкідливих програм або програм-вимагачів, що можуть спричинити виток даних, перешкодити нормальному функціонуванню системи або навіть зупинити операції.

3. Несправності обладнання: автоматизовані системи можуть стикатися з технічними проблемами, помилками в програмному забезпеченні або апаратними несправностями, що можуть призвести до невірних дій під час швартовних операцій.

4. Втрати зв'язку: випадки втрати зв'язку між суднами або між судном і береговим оператором можуть створити ризик неконтрольованої або неправильної роботи систем керування швартуванням.

Для ефективного управління та пом'якшення наслідків цих ризиків і загроз кібербезпеки рекомендується вживати такі заходи:

1. Захист мережі та систем.
2. Аутентифікація та авторизація.
3. Захист від вірусів та шкідливих програм.
4. Резервне копіювання даних.
5. Технічна підтримка та навчання персоналу.
6. Аудит безпеки.
7. Встановлення протоколів реагування на інциденти.

Крім того, ведення документації відповідно до міжнародних стандартів, санкцій і змінних протоколів історично поклало значний тягар на екіпажі. Крім того, багато досвідчених співробітників не пройшли адекватного і послідовного навчання щодо найсучасніших і найновіших методів і несподіваних відхилень. Багато проблем виникло через обмін інформацією, координацію і комунікацію, прийняття рішень і управління часом, що збільшило навантаження на всі сторони, призвело до людських помилок і створило загальну плутанину, пов'язану із залученими сторонами та їхніми обов'язками.

Транспортна галузь потребує діджиталізації своїх операцій, зокрема, пов'язаних з обміном інформацією. Одним з рішень є використання нових технологій, в тому

числі технології розподіленого реєстру, часто званої технологією блокчейн, яка дозволяє обмінюватися даними для здійснення транзакцій, сприяючи переміщенню потоків даних безпосередньо між сторонами у високозахиснений спосіб [3]. Використання блокчейну може підвищити прозорість, ефективність та моніторинг даних, що впливають на безпеку автоматизованих швартовних операцій.

Формулювання цілей статті. У цій статті автори ставлять на меті дослідження кібербезпеки при виконанні автоматизованих швартовних операцій між суднами, з використанням технології блокчейн, з метою підвищення безпеки автоматизованих швартовних операцій, як приклад зв'язку з реєстрацією даних Глобальної системи позиціонування (GPS), а отже, будь-які сумніви, щодо зон впливу будуть виключені. Однак важливо зазначити, що ця технологія може бути застосована в багатьох інших сферах судноплавства. Вона може поліпшити управління процесом і забезпечити потік даних в режимі реального часу, а отже, підвищити безпеку від маніпуляцій із записами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологія розподіленого реєстру, також відома як технологія блокчейн [4], спочатку набула популярності як платформа для управління цифровою криптовалютою [5; 6]. У 2008 році Сатоші Накамото представив першу платіжну систему – біткоїн, засновану на технології блокчейн [7; 8; 9]. У цій роботі автори використовували технологію децентралізованого управління (ТДУ) як аббревіатуру для технології блокчейн. ТДУ визначається як спільна технологія розподіленого реєстру (ТРР), яка полегшує процес запису [10]. ТДУ – це процес, який розділяє дані в режимі реального часу на вузли, які захищені за допомогою унікальних криптографічних алгоритмів для забезпечення конфіденційності та безпеки [11]. Як зазначено в [12], ТДУ є найпотужнішою розподіленою базою даних, яка складається з груп даних та інформаційних блоків, що робить конфіденційні дані високо захищеними та доступними для авторизованих користувачів за допомогою використання «ключів». Блокчейн – це технологія, яка підтримує розподіл записаних і незмінених даних у книзі між сторонами. Ці реєстри з інформацією передаються через сіткову топологію до більшої спільноти (також відомої як однорангова мережа або технологія) [13; 14]. ТДУ – це технологія децентралізованого управління [14; 15]. Залежно від технології, блокчейн може використовувати приватні або публічні реєстри та мережі [13; 16]. У публічному (відкритому або бездозвільному) ТДУ реєстри доступні, і будь-хто може записати транзакцію і відстежити історичну транзакцію в реєстрі (тобто повністю розподілені між великою кількістю публічних користувачів). Публічні ТДУ вимагають високого рівня безпеки та надійності через існування анонімних користувачів та відсутність довіри. Приватні мережі (закриті або дозволені) ТДУ означають, що сторони або вузли знають один одного або немає необхідності в анонімності, що є протилежністю публічним або відкритим ТДУ, де обмін даними та інформацією вимагає анонімних користувачів (криптографічний метод). У приватних ТДУ або дозволених доступ обмежений певними службами або сторонами. У цьому випадку з'являється нова специфічна роль (рекомендована національною або міжнародною організацією), яка забезпечує сертифікацію мережі та підтримує цю приватну мережу [13]. Структура ТДУ виглядає таким чином: визначення послуг/сторін; агент створює транзакцію для перевірки; вузли в ланцюжку схвалюють

кожну транзакцію; транзакція додається в новий блок; запис цієї транзакції зберігається в декількох розподілених вузлах для забезпечення безпеки.

Виклад основного матеріалу. Одними з основних особливостей представленої технології є використання смарт-контрактів та токенизація активів [11]. Основною перевагою цього є те, що вся інформація, яка зберігається в блоці, є незмінною і не може бути видалена або змінена без згоди мережі. Довіра, незмінність і прозорість, дезінтермедіація та суттєві покращення – це унікальні цінності блокчейн [17].

Замість того, щоб покладатися на центральний сервер для інтеграції, перевірки, зберігання даних вручну, а потім фізичного обміну, кожен вузол або учасники взаємопов'язаної мережі дублюють всю інформацію, яку можна контролювати і використовувати для різних розслідувань (морські аварії) або наукових цілей. Транзакція складається з даних, хешу і попереднього хешу, які представлені в окремому блоці (рис. 1). Кожен блок може складатися з однієї або декількох транзакцій. Кожен хеш є унікальним цифровим відбитком транзакції в блоці, і новий хеш надається всім новим блокам, які були створені в ланцюжку.

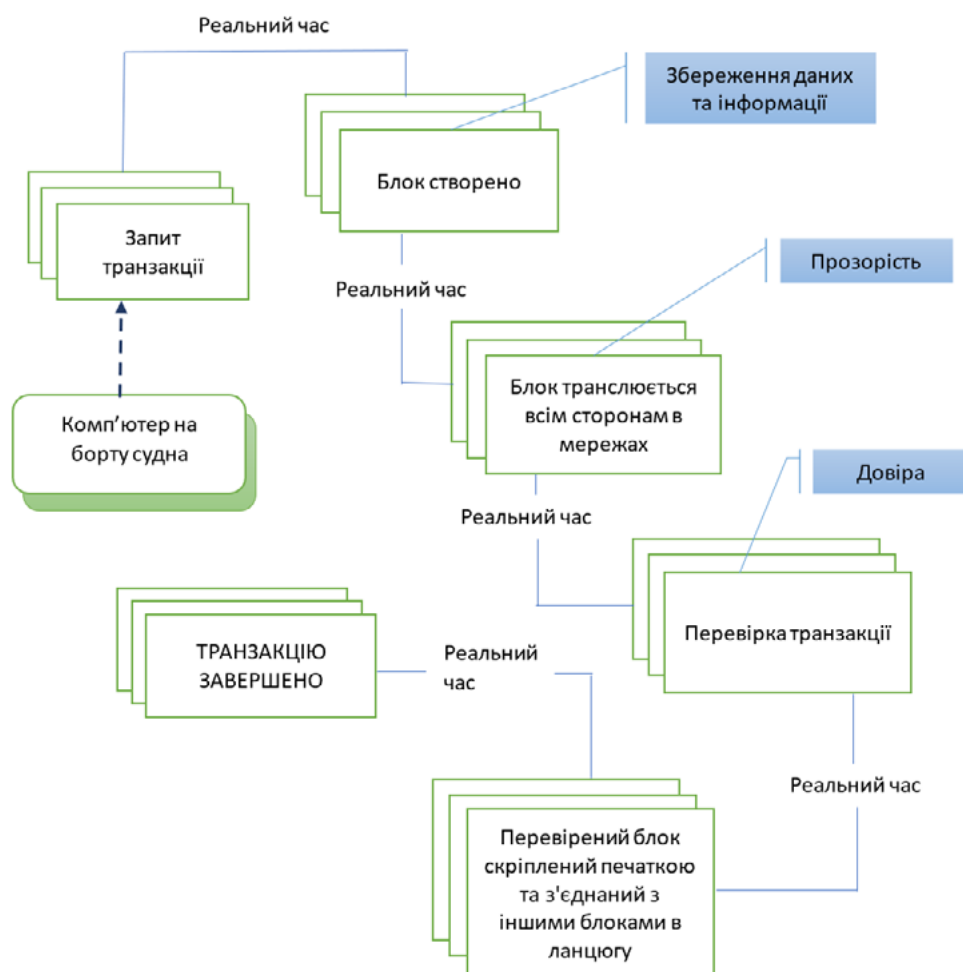


Рис. 1. Схема алгоритму виконання транзакції по технології блокчейн

Набір інструментів, що забезпечують різні реалізації цієї технології, складається з наступного: однорангова мережа, база даних для запису транзакцій, набір функцій безпеки, доказ роботи (PoW) або доказ частки (PoS), механізм консенсусу, тощо [18]. Запропоновано публічний або бездозвільний ланцюжок блоків як інструмент для розподілу важливих даних між кількома сторонами, які не довіряють одна одній. Всі сторони в запропонованому блокчейні не мають публічної ідентичності. Блоки важко змінити, маніпулювати ними або зламати. Для успішної фальсифікації інформації необхідно переформатувати весь блокчейн [19]. Кожна транзакція в нашому випадку, наприклад, дані про місцезнаходження судна, час, відстань до іншого транспортного засобу, записується в цифрову книгу, а кілька транзакцій утворюють блок [20]. Однак певні сторони можуть обмежити публічний доступ до цих даних, щоб уникнути будь-яких публічних маніпуляцій з ними. Ці організації можуть виявляти особливий інтерес до діяльності, що відбувається на борту судна.

Блокчейн був прийнятий у багатьох галузях, включаючи освіту, охорону здоров'я, адміністрування, транспортування товарів, кібербезпеку та фінансові послуги [8; 21]. В освіті він використовується для заміни паперових сертифікатів на цифрові сертифікати учня на блоках або в публічному реєстрі і має довіру між усіма сторонами (навчальним закладом, учнем і третьою стороною). Університет Нікосії був попередником цієї інновації і запровадив процес сертифікації через блокчейн [11]. Впровадження блокчейн в освіту принесло низку переваг, серед яких: обмін ідеями та навчанням, можливості взаємного навчання, інтегрована система відстеження документів, мульти-співпраця з транзакціями цифрових сертифікатів та зв'язок між усіма сторонами валідації, верифікації та видачі сертифікатів.

Впровадження технології блокчейн у судноплавну галузь та її застосування для оцифрування товаросупровідних документів детально розглянуто в роботі [22]. Автори дослідили процес впровадження технології блокчейн у сферу судноплавства. Вони виявили, що судноплавство – це інформаційна інфраструктура з соціально-технічним ядром, що розвивається з часом завдяки діяльності всіх зацікавлених сторін. Автори навели приклади застосування технології блокчейн у проєкті підтвердження концепції Maersk Line та International Business Machines (IBM), а також у рішенні Marine Transport International під назвою Safety of Lives at Sea – Verified Gross Mass (SOLAS VGM), яке стосується передачі даних про вагу контейнера в системі електронного обміну даними (EDI) на вимогу ІМО. Галузь тестує морські блокчейн-додатки з 2017 року. Деякі з найважливіших судноплавних компаній, такі як Maersk, Hyundai Merchant Marine і Maritime Silk Road Platform, об'єдналися з технологічними гігантами для створення блокчейн-судноплавних систем для оптимізації морської логістики [23].

Рішення та архітектура технології розподіленого реєстру у сфері морського захисту. Наведена нижче модель (рис. 2) має на меті надати спрощену версію перевіреної публічної мережі блокчейн-мережі між стейкхолдерами в рамках наскрізної моделі обміну інформацією про морські перевезення. Передумовою є те, що багато сторін (тобто судноплавна компанія, портові адміністрації, капітан порту або берегова охорона, ІМО, національний законодавець) матимуть доступ до інформації, що міститься в ній, і зможуть підтвердити її достовірність, в той час як контент зберігатиметься і буде захищений в архітектурі публічної

хмари. Це дозволить місцевим службам руху суден, капітанам, відділам моніторингу головного офісу і державним органам мати колективний огляд маршрутів суден, записів про вантаж і пасажирів (за умови дотримання стандартного Загального регламенту про захист даних та інших глобальних вимог щодо конфіденційності). Механізм повернення цієї інформації також використовує передову технологію оптичного розпізнавання чартерів. Центральний базовий комп'ютер, який вже існує на борту судна, буде збирати дані, а всі дії, пов'язані з експлуатацією судна, будуть завантажуватися на платформу в режимі реального часу. Всі ці записи даних в тому числі і щодо виконання автоматизованих швартовних операції можна буде відслідковувати в блокчейні через платформу.

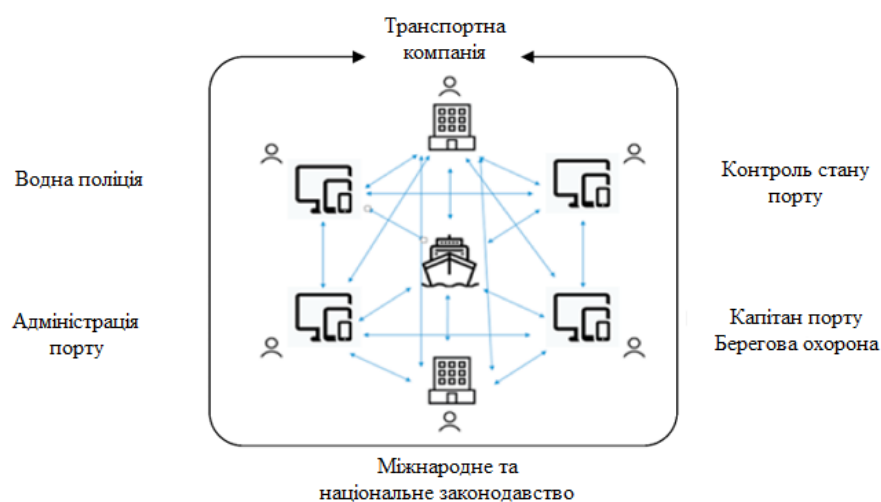


Рис. 2. Структура платформи обміну транспортною інформацією на основі блокчейну

Дані надходять і одночасно перевіряються всіма зацікавленими сторонами для досягнення консенсусу. Після розповсюдження в системі записи зберігаються та захищаються в централізованій книзі блокчейну. Згодом вони стають незмінними, а посередники/внутрішні відділи, які в минулому мали справу з паперовими записами, що передбачало ручні операції, тепер усуваються, що призводить до створення записів, захищених від несанкціонованого втручання. Процес міграції може бути ефективно керованим без втручання у встановлений протокол; проте для відповідних спеціалістів-моряків рекомендується і підтримується участь у спеціалізованих освітніх курсах. Завдяки індустріалізації даних для спільноти зацікавлених сторін і підвищенню рівня безпеки та співпраці результати сприятимуть прискоренню автоматизації перевірок, а в разі виникнення конфліктів – створенню єдиного джерела даних для вирішення запитів.

Подібно до авіаційної галузі вимога щодо зниження витрат на передачу даних в морській галузі розвивалася повільніше. Однак створення функціональних можливостей у електронному форматі, які забезпечують інтеоперабельність та крос-платформеність, а також інтеграцію операційних стандартів та загальноекономічну

ефективність, особливо в контексті ланцюга поставок, є потужним інструментом. Найбільшим викликом є залучення інвестицій та визначення піонерів, які зроблять ці технології стандартом в галузі. Дані є очевидним побічним продуктом цієї технології, який сам по собі може призвести до цілої низки інсайтів і, відповідно, до покращення сервісу. Опитування в режимі реального часу серії точок даних може бути використано для забезпечення предиктивної аналітики та обслуговування оповіщень, які, ймовірно, будуть розміщені у відкритій хмарі. Це також підвищить ефективність роботи капітана і старшого механіка, усунувши залежність від ручних стримувань і противаг з боку екіпажів з експлуатації та технічного обслуговування [23]. Проривні технології в контексті управління безпекою також мають великий потенціал. Насамперед, прості методи комунікації між членами екіпажу забезпечать інформування всіх членів екіпажу про ключові повідомлення у непомітний спосіб, без необхідності оголошень по радіо. Це пов'язано з дискретністю, вартістю і цільовою моделлю. На відміну від одночасного оповіщення всього екіпажу, важливу інформацію можна передавати конкретним особам, не відволікаючи весь екіпаж і використовуючи особисті пристрої на основі принципу «принеси свій власний пристрій», який поширений в інших галузях. Цифрові ролі в судноплавних і морських організаціях повинні бути розширені, в кінцевому рахунку, під керівництвом директора з цифрових технологій і даних. Ці особи повинні працювати як зі своїми організаціями, так і в консорціумах, очолюваних галузевими організаціями, для визначення пріоритетних напрямків і спільної розробки та структури інструментів, які можуть бути використані найкращим чином. Інноваційні хаби та акселераційні лабораторії можуть отримати найкращу підтримку від закладів вищої освіти, за умови, що вони знайомі з поточними розробками, для підтримки виробничих, технологічних та операційних пропозицій.

Технологія блокчейн може допомогти у вирішенні обох питань, скорочуючи адміністративні витрати і забезпечуючи безпеку судноплавства, одночасно захищаючи галузь від кіберзлочинності та піратства, а також забезпечуючи більш справедливі умови для всіх залучених сторін. Впроваджуючи блокчейн і заходи безпеки в критичних точках (тобто крок за кроком у часі), підвищення безпеки під час автоматизованих швартовних операцій можна було б запобігти заздалегідь. У цьому випадку блокчейн можна використовувати як інструмент для кращого прийняття рішень, що має бути спільним інтересом для всіх сторін у ланцюжку. Національні регулятори (законодавці) у співпраці з ІМО регулюватимуть морські операції. Поправки до нормативних актів, що стосуються застосування морського ТРР, будуть своєчасно і належним чином інтегровані в систему, що дозволить їй адаптуватися і залишатися актуальною. Наприклад, судноплавні компанії, згідно з правилами ІМО та прибережних держав, мають певні вимоги щодо оприлюднення різних даних, пов'язаних з безпекою суден, а також нових екологічних даних у відкритому доступі. Національні регулятори у співпраці з ІМО вирішуватимуть, хто буде сторонами і якими ключами вони володітимуть, щоб брати участь в обміні даними, а також які дані вони отримуватимуть. ІМО делегує спеціальну агенцію, яка відповідатиме за створення апаратного та програмного забезпечення, тобто морських додатків. Програмне забезпечення буде повністю налаштоване відповідно до вимог і правил ІМО. Іншими словами, буде

створено програмне забезпечення, яке покладатиметься на блокчейни для підвищення безпеки, захисту та плинності даних. Оскільки блокчейн – це архітектура, яка дозволяє розрізненим користувачам здійснювати транзакції, а потім створює незмінний, безпечний запис цих транзакцій, він спрощує управління даними, створюючи надійну цифрову книгу, з якою погоджуються всі сторони.

Традиційні письмові записи про судноплавні операції (спеціальні форми) повинні бути підписані і завірені печаткою капітана. Використання датчиків даних та інформаційних технологій разом з ТДУ могло б зменшити робоче навантаження, кількість порушень, упущень і помилок екіпажу, покращити моніторинг і підвищити рівень захисту навколишнього середовища. Завдяки використанню ТДУ капітан може бути поінформований про поточний стан конкретних пристроїв на судні за допомогою повідомлень, що надаються в режимі реального часу. Таким чином, виключається необхідність заповнення письмової форми, обмежується безпосередня відповідальність капітанів, а всі групи, які отримують інформацію, можуть своєчасно реагувати на неї в разі потреби. Помилки в комунікації зводяться до мінімуму, підвищується рівень знань та обізнаності, а також покращуються безпека швартовних операцій.

Обмеження технології ТРР можуть виникати в дисковому просторі. Велика кількість транзакцій даних може сповільнити процес і знизити ефективність. Автори запропонували отримувати дані в режимі реального часу з певної відстані від узбережжя, щоб зменшити великі обсяги даних та інформації. Кількість користувачів у блокчейні може зробити систему стійкішою до будь-яких випадків атак (як кібернетичних, так і порушень шляхом зміни даних) або збоїв. Впровадження технології блокчейн в судноплавну галузь, особливо судноплавні компанії, повинні визнати цю технологію. Високоякісне апаратне і програмне забезпечення для ефективної роботи системи є основною проблемою, яка заважає великим установам впроваджувати блокчейн. Підтримка інформаційних систем також є важливим фактором і викликом.

ІМО визнала потенційну проблему і морський кіберризик. ІТ та операційні технології автоматизовані, і на борту суден та на березі необхідна висока компетентність. Технології можуть опинитися під загрозою через потенційні обставини або події, які можуть призвести до пов'язаних з судноплавством збоїв в експлуатації, безпеці або захищеності внаслідок пошкодження, втрати або компрометації інформації або систем. Керівництву судноплавства пропонується кілька керівних принципів ІМО. Всі сторони повинні пройти навчання з операційних технологій (ОТ) та інформаційних технологій (ІТ), навіть незважаючи на те, що блокчейн – це технологія з високим ступенем кіберзахисту. Всі сторони, що беруть участь у ТДУ, повинні бути добре підготовлені. Впровадження ТДУ під час автоматизованих швартовних операцій дозволить звести до мінімуму спілкування між членами екіпажу на борту судна з цього питання, таким чином мінімізуючи помилки через непорозуміння. Крім того, однією з переваг використання ТДУ в цьому випадку є мінімізація зовнішньої комунікації.

Ефективне управління кібербезпекою в процесі виконання автоматизованих швартовних операцій вимагає комплексного підходу, включаючи технічні, організаційні та освітні заходи. Систематичне оновлення заходів кібербезпеки та постійне

вдосконалення практик можуть допомогти позбавити швартові операції від багатьох потенційних ризиків і зберегти безпеку морського та річкового транспорту.

SWOT – аналіз (сильні та слабкі сторони, можливості, загрози) є корисним інструментом, який допомагає визначити та класифікувати аспекти внутрішнього та зовнішнього середовища. У цьому дослідженні середовище буде складатися з автоматизованих швартовних операцій Ship to ship, а шаблон SWOT-аналізу, показаний на рисунку 3, буде заповнений її внутрішніми сильними і слабкими сторонами, а також зовнішніми можливостями та загрозами.

СИЛЬНІ СТОРОНИ	СЛАБКІ СТОРОНИ
МОЖЛИВОСТІ	ЗАГРОЗИ

Рис. 3. Шаблон SWOT-аналізу

Огляд наявної літератури свідчить про те, що дуже мало відомо про кібербезпеку та її слабкі місця в галузі автоматизації швартовних операцій Ship to ship, зокрема на рисунку 4 показані результати дослідження згруповані за категоріями внутрішніх сильних та слабких сторін, а також можливостей та загроз.

СИЛЬНІ СТОРОНИ	СЛАБКІ СТОРОНИ
<ul style="list-style-type: none"> • Зростаюча увага до кібербезпеки у морському секторі, що створює сприятливе середовище для дослідження та розробки нових підходів до управління кіберризиками. • Використання автоматизованих систем у швартовних операціях Ship to ship, що забезпечує ефективність та точність операцій. • Наявність міжнародних стандартів та рекомендацій щодо кібербезпеки в морській галузі, що служить основою для розробки стратегій та політик. 	<ul style="list-style-type: none"> • Недостатня усвідомленість ризиків кібербезпеки серед учасників морського сектору, зокрема операторів суден і берегового персоналу. • Відсутність обов'язкових нормативних актів, які б регулювали вимоги до кібербезпеки в швартовних операціях Ship to ship. • Складність координації між різними зацікавленими сторонами, включаючи судновласників, операторів терміналів, портові власті та органи регулювання.
МОЖЛИВОСТІ	ЗАГРОЗИ
<ul style="list-style-type: none"> • Постійний розвиток технологій та інновацій, що дозволяє впроваджувати нові рішення для підвищення кібербезпеки в швартовних операціях. • Міжнародне співробітництво та обмін досвідом між країнами щодо кібербезпеки в морському секторі. • Зростаюча свідомість про необхідність захисту від кіберзагроз у морській галузі, що сприяє підвищенню інвестицій у кібербезпеку. 	<ul style="list-style-type: none"> • Динамічність природи кіберзлочинності та кібератак, що створює виклики для постійного оновлення стратегій та технологій кібербезпеки. • Висока складність виявлення та ідентифікації нових видів кіберзагроз та їхніх наслідків. • Недостатня координація та співпраця між судновласниками, операторами терміналів, портовими властями та органами регулювання щодо кібербезпеки.

Рис. 4. SWOT-аналіз процесу автоматизації швартовних операцій Ship to ship

Для ефективного управління та пом'якшення наслідків кіберризиків у швартовних операціях Ship to ship в морській галузі необхідно враховувати сильні сторони, здолати слабкі сторони, використовувати можливості та протидіяти загрозам. Це може бути досягнуто шляхом впровадження ефективних стратегій кібербезпеки, нормативного регулювання, посилення свідомості та освіти щодо кібербезпеки, співпраці між стейкхолдерами та постійного моніторингу та аналізу кіберзагроз.

Висновки. У цій статті автори представили технологію децентралізованого управління як інструмент для зберігання значного обсягу інформації на борту суден для наукових цілей і заходів із запобігання аварій та інцидентів при виконанні швартовних операцій. Обґрунтуванням використання ТДУ є вирішення майбутніх труднощів, пов'язаних із впровадженням або прийняттям технології судноплавними компаніями. Ключовим викликом у цій галузі є заохочення судноплавних компаній до впровадження блокчейну, які повинні бути першими, хто перейде на цю технологію, враховуючи, що судноплавні компанії є операторами або власниками суден. Виходячи з професійного досвіду авторів та розслідувань морських інцидентів з баз даних, зрозуміло, що на борту суден відбувається багато інцидентів, пов'язаних зі швартовними операціями. Якщо всі судові технічні засоби будуть оцифровані, через додаткові застосування датчиків, інформація буде передаватися між відповідними сторонами, і управління більше не буде здійснюватися вручну. Зазначена важливість технології блокчейн і те, як вона може відігравати життєво важливу роль у морській індустрії, а також проаналізовані шляхи можливого застосування технології розподіленого реєстру як засобу контролю автоматизованих швартовних операцій. Застосування ТДУ може звести до мінімуму багато проблем, включаючи поліпшення обміну інформацією, посилення координації та комунікації, полегшення прийняття рішень, економію часу, зменшення робочого навантаження для всіх сторін, усунення помилок і недоліків, а також зниження відповідальності та підвищення рівня знань. Було рекомендовано, щоб усі дані, отримані з суден у режимі реального часу, були захищені кіберзахистом і постійно зберігалися в реєстрі, що могло б допомогти багатьом сторонам зменшити робоче навантаження, кількість перевірок і втрату часу. Стверджується, що для майбутнього розвитку морської індустрії існує широкий спектр можливостей для ТДУ. Традиційні паперові документи можуть бути оцифровані і прочитані за допомогою автоматизації, що забезпечує нову хвилю співпраці між безпекою судноплавства в усій судноплавній галузі. Таким чином, операційна ефективність може бути розподілена за допомогою нових технологій і безпечно впроваджена для стимулювання інновацій. Такі цифрові перетворення в судноплавній галузі повинні здійснюватися в кілька етапів. Згодом поетапний підхід до оптимізації обміну даними буде найкращим для подальших цифрових змін.

ЛІТЕРАТУРА

1. Li, X., Nosheen, S., Haq, N. U., & Gao, X. (2021). Value creation during fourth industrial revolution: Use of intellectual capital by most innovative companies of the world. *Technological Forecasting and Social Change*, 163, 120479. URL: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120479>.

2. Khan, R. U., Yin, J., Mustafa, F. S., & Shi, W. (2023). Factor assessment of hazardous cargo ship berthing accidents using an ordered logit regression model. *Ocean Engineering*, 284, 115211. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115211>.
3. Loklindt, C., Moeller, M., & Kinra, A. (2018). How blockchain could be implemented for exchanging documentation in the shipping industry. In *Lecture notes in logistics* (pp. 194–198). Springer Nature. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-74225-0_27.
4. Vujičić, S., Hasanspahić, N., Car, M., & Čampara, L. (2020). Distributed ledger technology as a tool for environmental sustainability in the shipping industry. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(5), 366. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse8050366>.
5. Trump, B. F., Florin, M., Matthews, H. S., Sicker, D., & Linkov, I. (2018). Governing the use of blockchain and distributed ledger technologies: Not One-Size-Fits-All. *IEEE Engineering Management Review*, 46(3), 56–62. URL: <https://doi.org/10.1109/emr.2018.2868305>.
6. Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2018). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2117–2135. URL: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1533261>.
7. Open Sea. Pro: How Can the Shipping Industry Take Advantage of the Blockchain Technology? Open Sea: New York, NY, USA; Available online. URL: <https://www.opensea.pro/blog/blockchain-for-shipping-industry>.
8. Ayvaz, S., & Cetin, S. (2019). Witness of things. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, 7(2), 72–87. URL: <https://doi.org/10.1108/ijius-05-2018-0011>.
9. Ponte, E. B., & Bednárová, M. (2019). Blockchain and its implications for accounting and auditing. *Meditari Accountancy Research*, 27(5), 725–740. URL: <https://doi.org/10.1108/medar-11-2018-0406>.
10. Gausdal, A. H., Czachorowski, K. V., & Solesvik, M. (2018). Applying Blockchain Technology: Evidence from Norwegian Companies. *Sustainability*, 10(6), 1985. URL: <https://doi.org/10.3390/su10061985>.
11. Harthy, K. A., Shuhaimi, F. A., & Ismail, K. A. (2019). The upcoming Blockchain adoption in Higher-education: requirements and process. URL: <https://doi.org/10.1109/icbdsc.2019.8645599>.
12. Eaganathan, U., Indrian, V. V., & Nathan, Y. (2019). Ideation framework of block chain adoption in Malaysia higher education. *Journal of Physics*, 1228(1), 012072. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1228/1/012072>.
13. Trump, B. F., Florin, M., Matthews, H. S., Sicker, D., & Linkov, I. (2018b). Governing the use of blockchain and distributed ledger technologies: Not One-Size-Fits-All. *IEEE Engineering Management Review*, 46(3), 56–62. URL: <https://doi.org/10.1109/emr.2018.2868305>.
14. Khatoun, A. (2020). A Blockchain-Based smart contract system for healthcare management. *Electronics*, 9(1), 94. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics9010094>.

15. McGhin, T., Choo, K. R., Liu, C. Y., & He, D. (2019). Blockchain in healthcare applications: Research challenges and opportunities. *Journal of Network and Computer Applications*, 135, 62–75. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.02.027>.
16. Kouhizadeh, M., & Sarkis, J. (2018). Blockchain Practices, Potentials, and Perspectives in greening supply Chains. *Sustainability*, 10(10), 3652. URL: <https://doi.org/10.3390/su10103652>.
17. Makridakis, S., & Christodoulou, K. (2019). Blockchain: Current Challenges and Future Prospects/Applications. *Future Internet*, 11(12), 258. URL: <https://doi.org/10.3390/fi11120258>.
18. Hofmann, E., Strewe, U. M., & Bosia, N. (2017). Background III—What is blockchain technology? In SpringerBriefs in finance. *Springer International Publishing*. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-62371-9_4.
19. White, G. R. (2017). Future applications of blockchain in business and management: A Delphi study. *Strategic Change*, 26(5), 439–451. URL: <https://doi.org/10.1002/jsc.2144>.
20. Swan, M. (2015). Blockchain: blueprint for a new economy. URL: <http://cds.cern.ch/record/2000805>.
21. Gurtu, A., & Johny, J. (2019). Potential of blockchain technology in supply chain management: a literature review. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 49(9), 881–900. URL: <https://doi.org/10.1108/ijpdlm-11-2018-0371>.
22. Jabbar, K., & Bjørn, P. (2018). Infrastructural grind. URL: <https://doi.org/10.1145/3148330.3148345>.
23. Ko, T., Lee, J., & Ryu, D. (2018). Blockchain technology and Manufacturing Industry: Real-Time transparency and cost savings. *Sustainability*, 10(11), 4274. URL: <https://doi.org/10.3390/su10114274>.

REFERENCES

1. Li, X., Nosheen, S., Haq, N. U., & Gao, X. (2021). Value creation during fourth industrial revolution: Use of intellectual capital by most innovative companies of the world. *Technological Forecasting and Social Change*, 163, 120479. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120479>
2. Khan, R. U., Yin, J., Mustafa, F. S., & Shi, W. (2023). Factor assessment of hazardous cargo ship berthing accidents using an ordered logit regression model. *Ocean Engineering*, 284, 115211. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115211>
3. Loklindt, C., Moeller, M., & Kinra, A. (2018). How blockchain could be implemented for exchanging documentation in the shipping industry. In *Lecture notes in logistics* (pp. 194–198). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74225-0_27
4. Vujičić, S., Hasanspahić, N., Car, M., & Čampara, L. (2020). Distributed ledger technology as a tool for environmental sustainability in the shipping industry. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(5), 366. <https://doi.org/10.3390/jmse8050366>

5. Trump, B. F., Florin, M., Matthews, H. S., Sicker, D., & Linkov, I. (2018). Governing the use of blockchain and distributed ledger technologies: Not One-Size-Fits-All. *IEEE Engineering Management Review*, 46(3), 56–62. <https://doi.org/10.1109/emr.2018.2868305>
6. Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2018). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2117–2135. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1533261>
7. Open Sea. Pro: How Can the Shipping Industry Take Advantage of the Blockchain Technology? Open Sea: New York, NY, USA; Available online: <https://www.opensea.pro/blog/blockchain-for-shipping-industry>
8. Ayvaz, S., & Cetin, S. (2019). Witness of things. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, 7(2), 72–87. <https://doi.org/10.1108/ijius-05-2018-0011>
9. Ponte, E. B., & Bednárová, M. (2019). Blockchain and its implications for accounting and auditing. *Meditari Accountancy Research*, 27(5), 725–740. <https://doi.org/10.1108/medar-11-2018-0406>
10. Gausdal, A. H., Czachorowski, K. V., & Solesvik, M. (2018). Applying Blockchain Technology: Evidence from Norwegian Companies. *Sustainability*, 10(6), 1985. <https://doi.org/10.3390/su10061985>
11. Harthy, K. A., Shuhaimi, F. A., & Ismail, K. A. (2019). The upcoming Blockchain adoption in Higher-education: requirements and process. <https://doi.org/10.1109/icbdsc.2019.8645599>
12. Eaganathan, U., Indrian, V. V., & Nathan, Y. (2019). Ideation framework of block chain adoption in Malaysia higher education. *Journal of Physics*, 1228(1), 012072. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1228/1/012072>
13. Trump, B. F., Florin, M., Matthews, H. S., Sicker, D., & Linkov, I. (2018b). Governing the use of blockchain and distributed ledger technologies: Not One-Size-Fits-All. *IEEE Engineering Management Review*, 46(3), 56–62. <https://doi.org/10.1109/emr.2018.2868305>
14. Khatoon, A. (2020). A Blockchain-Based smart contract system for healthcare management. *Electronics*, 9(1), 94. <https://doi.org/10.3390/electronics9010094>
15. McGhin, T., Choo, K. R., Liu, C. Y., & He, D. (2019). Blockchain in healthcare applications: Research challenges and opportunities. *Journal of Network and Computer Applications*, 135, 62–75. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.02.027>
16. Kouhizadeh, M., & Sarkis, J. (2018). Blockchain Practices, Potentials, and Perspectives in greening supply Chains. *Sustainability*, 10(10), 3652. <https://doi.org/10.3390/su10103652>
17. Makridakis, S., & Christodoulou, K. (2019). Blockchain: Current Challenges and Future Prospects/Applications. *Future Internet*, 11(12), 258. <https://doi.org/10.3390/fi11120258>
18. Hofmann, E., Strewe, U. M., & Bosia, N. (2017). Background III—What is blockchain technology? In *SpringerBriefs in finance*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62371-9_4

19. White, G. R. (2017). Future applications of blockchain in business and management: A Delphi study. *Strategic Change*, 26(5), 439–451. <https://doi.org/10.1002/jsc.2144>
20. Swan, M. (2015). Blockchain: blueprint for a new economy. Retrieved from <http://cds.cern.ch/record/2000805>
21. Gurtu, A., & Johny, J. (2019). Potential of blockchain technology in supply chain management: a literature review. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 49(9), 881–900. <https://doi.org/10.1108/ijpdlm-11-2018-0371>
22. Jabbar, K., & Bjørn, P. (2018). Infrastructural grind. <https://doi.org/10.1145/3148330.3148345>
23. Ko, T., Lee, J., & Ryu, D. (2018). Blockchain technology and Manufacturing Industry: Real-Time transparency and cost savings. *Sustainability*, 10(11), 4274. <https://doi.org/10.3390/su10114274>

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ НАВІГАЦІЇ ТА ПЛАНУВАННЯ ШЛЯХУ АВТОНОМНОГО НАДВОДНОГО СУДНА

Б.О. Єрмоленко

аспірант кафедри програмованої електроніки електротехніки та телекомунікацій,
Національний університет кораблебудування імені Адмірала Макарова,
Миколаїв, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-0353-891X

Анотація

Вступ. Автономні надводні судна (АНС) та їх застосування у дослідженнях різної складності є актуальною галуззю досліджень. Автономні надводні судна – це пристрої, здатні самостійно рухатись водним середовищем і виконувати різні завдання та проводити збір даних. Сфери застосування цих засобів пов'язані з водними ресурсами. Залучення АНС у різних дослідницьких місіях демонструє інтерес наукової спільноти до подібних платформ. В океанографії надводні дрони можуть допомогти збирати дані про температуру води, солоність, рівень кисню, хвильову активність та інші параметри. Це надає вченим більш повну картину про океанські явища та динаміку змін, що сприяє покращенню розуміння кліматичних процесів та екосистем океану. Подальша розробка та вдосконалення суден важливе питання та має велике практичне значення для галузей пов'язаних з водними ресурсами. **Метою** статті є проведення дослідження методів навігації та особливостей руху АНС, проблем та шляхів підвищення ефективності руху по заданому маршруту. Сфокусувати увагу на процесі планування шляху АНС як важливого етапу, на якому базується рух автономного судна, та провести огляд алгоритмів оптимізованого руху як аспекту планування шляху для знаходження потенційних шляхів покращення ефективності роботи. **Результати.** В статті проведено огляд методів навігації та особливостей руху АНС, основних структурних елементів та систематизовано основні проблеми та виклики, які наразі існують. Також проведений аналіз процесу планування шляху АНС як важливого етапу, який лежить в основі руху АНС по заданому маршруті. Досліджено важливий аспект планування шляху, а саме алгоритми оптимізованого руху як потенційних шляхів підвищення ефективності руху. На основі дослідження було сформовано критерії оптимальності, урахування яких у роботі алгоритму дасть змогу покращити будовання шляху та поліпшить загальну ефективність під час переміщення АНС. **Висновки.** Дослідження та розробка Автономних надводних суден продовжується і надалі. Зацікавленість у подібних суднах обумовлена широкими можливостями, які дозволяють застосувати їх у різних дослідницьких місіях. Враховуючи викладене, можна зробити висновок, що ефективний руху АНС під час виконання завдань – це комплексний процес, в основі якого лежить злагоджена робота навігаційної системи, правильно спланований маршрут та врахування зовнішніх факторів впливу. Розвиток алгоритмів оптимізованого

руху дозволяють забезпечити гнучкість та адаптивність до змінних умов, що здатні забезпечити найкращі рішення в реальному часі. Подальше дослідження та впровадження алгоритмів оптимізації руху АНС відкриває нові перспективи для створення повністю автономних засобів нового покоління.

Ключові слова: автономні надводні судна, навігація, дистанційне керування, електродвигун, судно, автопілот, планування шляху, алгоритм оптимізованого руху.

ANALYSIS OF THE NAVIGATION AND PATH PLANNING PROCESS OF AN AUTONOMOUS SURFACE VESSEL

В.О. Yermolenko

Postgraduate Student at the Department of Programmable Electronics,
Electrical Engineering and Telecommunications,
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-0353-891X

Summary

Introduction. Autonomous surface vessels (UAVs) and their use in research of various complexity is an actual field of research. Autonomous surface vessels are devices capable of independently moving through the water environment and performing various tasks and collecting data. The spheres of application of these means are related to water resources. The involvement of ANS in various research missions demonstrates the interest of the scientific community in such platforms. In oceanography, surface drones can help collect data on water temperature, salinity, oxygen levels, wave activity, and other parameters. This provides scientists with a more complete picture of ocean phenomena and dynamics of change, contributing to a better understanding of climate processes and ocean ecosystems. Further development and improvement of vessels is an important issue and has great practical significance for industries related to water resources. **The purpose** of the article is to conduct a study of navigation methods and features of ANS movement, problems and ways to increase the efficiency of movement along a given route. Focus attention on the ANS path planning process as an important stage on which autonomous vessel movement is based, and conduct a review of optimized motion algorithms as an aspect of path planning, in order to find potential ways to improve operational efficiency. **Results.** The article provides an overview of navigation methods and features of ANS movement, main structural elements, and systematizes the main problems and challenges that currently exist. An analysis of the ANS route planning process was also carried out, as an important stage that underlies the movement of the ANS along the given route. An important aspect of path planning, namely algorithms of optimized movement, as a potential way to improve movement efficiency, has been studied. On the basis of the research, optimality criteria were formed, taking into account of which in the algorithm's work will allow to improve the construction of the path, and improve the overall efficiency during the movement of the ANS. **Conclusions.** Research and development of Autonomous Surface Vessels continues. Interest in such vessels is due to the wide possibilities that allow them to be used in various research missions. Taking into account the above, it can be concluded that the effective movement of the ANS during the execution of tasks is a complex process based on the coordinated

operation of the navigation system, a correctly planned route, and consideration of external influencing factors. The development of algorithms for optimized movement allows for flexibility and adaptability to changing conditions, which can provide the best solutions in real time. Further research and implementation of ANS traffic optimization algorithms opens up new perspectives for the creation of fully autonomous vehicles of a new generation.

Key words: *autonomous surface vessels, navigation, remote control, electric motor, vessel, autopilot, path planning, optimized motion algorithm.*

Вступ. Використання автономних надводних суден (АНС), зокрема надводних дронів, які рухаються по заданій траєкторії, є актуальною галуззю дослідження для сучасної науки, тому що знаходить практичне застосування в різних сферах, включаючи наукові дослідження різного характеру, безпеку, екологію та ін. Автономні надводні судна являють собою пристрої, здатні самостійно рухатись водним середовищем і виконувати різні завдання та проводити збір даних. Це грає важливу роль для проведення наукових досліджень різного характеру.

Традиційно збір даних відбувається за допомогою людських експедицій на судах або використанням стаціонарних приладів. Однак цей підхід може бути обмежений з точки зору затрат, доступу до віддалених районів і можливостей спостереження. Автономні надводні судна дозволяють вирішити ці обмеження, оскільки вони можуть працювати відносно довгий час, автоматично пристосовуються до зміни умов та можуть працювати у різних місцевостях. За допомогою більш ефективного, компактного, комерційно-доступного та навігаційного обладнання, включаючи глобальні системи позиціонування, а також більш потужні та надійні системи бездротового зв'язку, розширило можливості АНС як інструменту досліджень. Їх можна програмувати для руху по заданій траєкторії або контролювати за допомогою супутникової навігації, аналізу даних сенсорів і штучного інтелекту. Наприклад, в океанографії надводні дрони можуть допомогти збирати дані про температуру води, солоність, рівень кисню, хвильову активність та інші параметри. Це надає вченим більш повну картину про океанські явища та динаміку змін, що сприяє покращенню розуміння кліматичних процесів та екосистем океану.

Постановка проблеми. Широкий спектр сфер використання та активний розвиток загальної концепції зробив АНС важливим інструментом досліджень різної складності. Створення повністю автономних АНС питання, яке широко досліджується багатьма розробниками. Однак ефективне функціонування АНС нерозривно пов'язане із навігацією та завданням планування руху. Постійні зміни динамічних умов середовища, потреба в енергозбереженні, забезпечення безпеки та ефективного виконання завдань ставлять перед процесом руху та планування шляху значні виклики. Вплив цих проблем не дозволяє ефективно виконувати рух по заданому маршруту, і тому загальна продуктивність роботи АНС сильно падає.

Формулювання цілей статті. Метою статті є проведення дослідження методів навігації та особливостей руху АНС, проблем та шляхів підвищення ефективності руху по заданому маршруту. Сфокусувати увагу на процесі планування шляху АНС як важливого етапу, на якому базується рух автономного судна, та провести огляд алгоритмів оптимізованого руху як аспекту планування шляху, задля знаходження потенційних шляхів покращення ефективності роботи.

Виклад основного матеріалу. Вплив кліматичних змін на водне середовище, проблеми охорони навколишнього середовища та вимоги до людських ресурсів призвели до попиту зі сторони військових, наукових та цивільних спільнот інноваційних пристроїв нового класу – автономних надводних суден (дронів), також відомих як Безпілотні надводні судна.

За останні десятиліття велика кількість науковців, розробників, дослідних центрів розробляли АНС для використання у різних місіях та дослідженнях [1].

АНС активно використовуються у різних сферах, пов'язаних з водними ресурсами. Серед головних галузей можна відокремити: наукові дослідження – батиметрична зйомка, дослідження діяльності океану, проведення тестувань подальших розробок АНС; екологічні місії – вимірювання стану забруднення, аналіз стану води, екологічний моніторинг навколишнього середовища, аналіз для попередження катастроф, допоміжне прогнозування; розвідка ресурсів океану – розвідка родовищ газу та нафти, будівництво та обслуговування морських платформ; військове використання – охорона та спостереження портової та берегової зони, пошукові та рятувальні роботи, розмінування, та дрони для інших військових потреб [2–5].

Широкий спектр сфер застосування призвів до створення великої кількості зразків різної форми та розмірів і різних корисних навантажень залежно від конкретного завдання. Для чіткого розуміння проблем, які розглядаються у статті, важливо визначити основні елементи, які повинні бути включені до кожного АНС: корпус та інші структурні елементи – класичний жорсткий корпус, катамарани, тримарани, каяки [6; 7]; силова установка і кермова система – за управління та рух у АНС відповідає рульова та гвинтова або водометна установка. Гвинтова установка на основі двигуну внутрішнього згоряння або електродвигуна; система наведення, навігації та контролю (GNC) – система, завдяки якій відбувається контроль за рухом у просторі під час роботи та обміном інформацією в середині самого судна. Використовуються системи GPS, інерційні вимірювальні пристрої (IMU) і комп'ютерні системи для роботи автопілоту, комунікації з пунктами управління задля стеження не тільки за рухом, а також за іншим обладнанням, яке встановлене на АНС [8]; обладнання для збору даних – до складу зазвичай входять навігаційні модулі та периферійне обладнання: камери, гідролокатори, сонари [9].

Методи навігації та наведення АНС. Безпечне та ефективне керування АНС значною мірою залежить від відповідної навігаційної систем, оцінки стану, аналізу навколишнього середовища та можливостей реакції на ситуацію. Маневрування по заданій траєкторії потребує високої точності керування, виникає потреба достатнього запасу працездатності, проблема обмежених енергоресурсів потребує використання якісних електронних та механічних компонентів, а також енергоефективних алгоритмів керування. За рух під час роботи відповідає система навігації та наведення. Робота навігаційних систем АНС складається з таких частин:

1) сприйняття середовища – це комплексний аналіз, який складається з обстеження морської поверхні, відстеження та знаходження об'єктів та уникнення перешкод. Активне сприйняття середовища використовує візуальні засоби отримання інформації, такі як камери, прилади інфрачервоного бачення. Активний метод використовує такі технології, як сонари, радари, Lidar [10];

2) аналіз стану – процес, який дає повну інформацію про загальне положення АНС, дає змогу керувати швидкістю та прискоренням. Інструментом функціонування є системи GPS та IMU або інші датчики. Але в процесі експлуатації виникає проблема впливу зовнішніх чинників, а також похибки в роботі датчика. Все це впливає на точність GPS та IMU систем під час оцінювання положення та орієнтації [11];

3) проведення зондування – саме отримання чіткої інформації від датчиків, дозволяє ефективно обробляти її;

4) ситуаційна обізнаність – важливий етап під час розробки АНС з підвищеним рівнем автономності. Загальний принцип роботи пов'язаний з відстеженням та виявленням змін на рівні об'єкта для подальшого знаходження цілей, підтвердження їх місцезнаходження та розпізнавання змін у навколишньому середовищі під час руху [9]. Частковим рішенням для подібного сценарію є застосування технології Симуляції, локалізації та картографування (SLAM).

Розробка стратегій контролю орієнтується на різні цілі, які можна загалом класифікувати у чотири категорії:

1. Відстеження траєкторії: автономне судно керується таким чином, щоб відстежувати бажану часову прив'язку, одночасно дотримуючись попередньо визначених просторових обмежень. Для повністю динамічних АНС ця проблема зараз достатньо вивчена.

2. Регулювання заданої точки: базовий контрольний елемент, який дає змогу узгодити орієнтацію та положення АНС під час руху.

3. Рух за заданим маршрутом: АНС рухається за запланованим шляхом, при цьому триматися заданої швидкості та слідкувати за траєкторією.

4. Маневрування на маршруті: відноситься до руху за заданим маршрутом. Ставиться дві головні задачі. Перша – геометрична, яка забезпечує рух АНС в умовах обмежень маневреності. Друга – це динамічне завдання, що вимагає від АНС виконувати під час руху по траєкторії деякі динамічні характеристики.

На основі проведеного аналізу технік навігацій АНС виявлені актуальні проблеми. Важливими питаннями вважають проблеми в униканні перешкод, швидкість проходження маршруту, проблеми автономії. Проблеми в надійності функцій наведення, навігації та контролю для використання у різних умовах експлуатації та складних середовищах.

Важливою проблемою також варто вважати підвищення ефективності планування шляху. Ефективно побудований маршрут дасть змогу економити енергетичні ресурси для руху, змінить підхід до виконання місій та розширить можливості у роботі.

Планування шляху АНС. Техніка наведення є важливою складовою будь-якого автономного судна. Для роботи у більш складних умовах з динамічно змінним середовищем потрібні більш розширені можливості наведення.

Планування шляху є важливою складовою наведення АНС. Головна ціль планування шляху – знаходження можливого шляху у певному середовищі. Процес планування умовно можна розділити на три етапи: планування маршруту, планування траєкторії та планування руху. Траєкторія повинна бути оптимізована з урахуванням відстані, часу, споживанням енергії, вартістю ризику та іншими

аспектами. Крім того, не можна ігнорувати плавність траєкторії та те, чи відповідає вона кінетичним обмеженням АНС.

Одними із головних методів, які використовують під час планування шляху, є використання алгоритмів оптимізованого руху. Цей підхід активно застосовується у всій робототехніці. Для найкращої оптимізації шляху необхідно зібрати інформацію про перешкоди: розмір, точне положення, швидкість та напрям руху. Якість застосування методу напряму залежить від функціонування датчиків.

Оптимізація руху безпілотних апаратів вимагає розв'язання складної задачі, яка полягає в мінімізації функції від цільових параметрів руху (швидкості, прискорення, кутової швидкості тощо) при заданих обмеженнях. За середовищем функціонування алгоритми оптимізації умовно класифікують на статичне та динамічне. За цією характеристикою можна відокремити дві великі категорії – Глобальні та Локальні алгоритми планування.

Глобальні алгоритми оптимізації маршрутів спрямовані на пошук оптимального маршруту задля досягнення цільової мети. Вони працюють на основі моделі маршрутів та загальної інформації про навколишнє середовище. Серед основних методів цього класу слід виділити Алгоритм штучних потенційних полів [12], Метод дорожньої карти [13], Алгоритм Дейкстри [14].

Одним із прикладів алгоритмів розглянуто алгоритм Дейкстри. Його ідея стала основою для утворення багатьох похідних алгоритмів, які базуються на клітковому розбитті. Працює через знаходження максимального значення (див. рис. 1), вага кожної сторони графа, та відстань повинні мати позитивні значення [15].

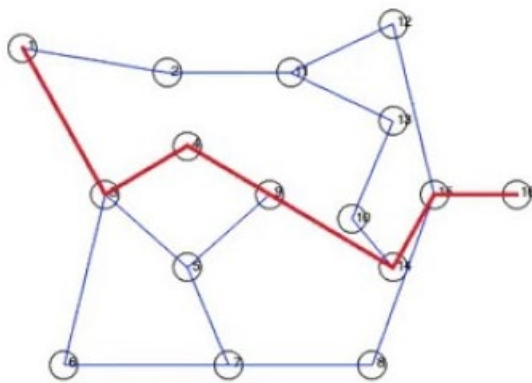


Рис. 1. Маршрут, побудований за допомогою графів

Іншим прикладом алгоритмів є алгоритм Rapidly-exploring Random trees (RRTs) – це імовірнісний алгоритм, який використовується для швидкого дослідження просторів та планування шляхів [16]. RRTs ефективно працює для задач з великою розмірністю, нелінійними, динамічними або диференціальними обмеженнями. Його сутність у створенні дерева (див. рис. 2), яке вирощується шляхом з'єднання випадкових вибірок у вільному просторі.

Локальні алгоритми планування працюють у середовищі, яке частіше невідоме та динамічне, і тому процес побудови маршруту відбувається саме під час руху. Його головна особливість полягає у тому, що маршрут генерується шляхом

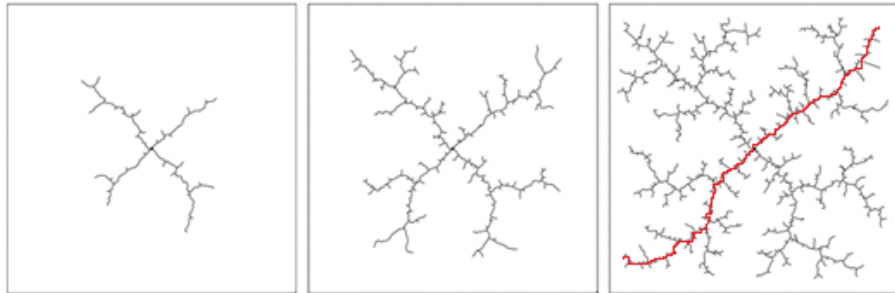


Рис. 2. Маршрут, побудований із дерева

отримання інформації від різноманітних датчиків у момент руху робота. Локальні методи планування шляху використовуються, коли мобільний робот перебуває у незнайомому середовищі, яка може містити кінцеве число обмежених перешкод, і у результаті робот має рухатись на цільову позицію. Цей підхід є технічно більш складним, але має широке застосування. До цієї групи алгоритмів відносяться: алгоритм локального потенційного поля [17], Метод гістограми векторного поля (VFH) [18], алгоритми сімейства Bug [19].

Метод потенційних полів (PFM) також є відомим представником локальних алгоритмів. У цьому методі об'єкт руху розглядається у ролі частинки, яка рухається під дією штучного потенціалу, створеного конфігурацією цілі та перешкодами (див. рис. 3).



Рис. 3. Маршрут, побудований із потенційних полів

Гібридне планування шляху з'явилося як результат спроб підвищити ефективність руху між змінними точками у небезпечному середовищі та поєднання підходів глобального та локального планування шляху. Цей підхід можна вважати рішенням для створення АНС, який буде працювати як в статичних, так і в динамічних середовищах [20]. З цього з'явилась ідея поєднання різних алгоритмів між собою. Наразі активно досліджуються алгоритми на основі нейронних мереж та машинному навчанні.

Ефективність застосування методів оптимізації руху АНС вимагає врахування великої кількості параметрів, які впливають на процес самої оптимізації. Зокрема, до таких параметрів можна віднести швидкість руху АНС, зону покриття, область руху та інші фактори, що пов'язані з характеристиками конкретного АНС.

На думку автора, одним із потенційних шляхів підвищення ефективності планування шляху є сформування чітких критерій оптимізації, які повинні виконуватись. Важливо зазначити, що ці параметри повинні виходити із цільового призначення АНС та самого алгоритму. Як результат проведеного дослідження сформовано такі критерії:

- довжина шляху – критерій важливості руху за найкоротшим шляхом;
- відстань до перешкоди під час руху – критерій, який впливає на безпечний рух робота на відстані від перешкод;
- рівномірність шляху – важливо щоб під час руху за маршрутом не було різких змін у траєкторії;
- фокус на стартовій точці – критерій необхідності знаходитись у зоні видимості початкової або фінішної точки. Цей критерій можна використовувати для побудови маршруту з урахуванням підтримки зв'язку з пунктом управління;
- масштабованість – критерій можливості працювати на різних територіях;
- пріоритетність – критерій виконання під час руху певних задач або досягнення певної точки. Залежить від цілей, які стоять перед АНС.

Дослідження та подальше вдосконалення алгоритмів оптимізації під час планування шляху для автономних надводних суден має великий потенціал для покращення ефективності руху, точності та безпеки їх функціонування. Алгоритми оптимізації дозволяють забезпечити гнучкість та адаптивність до змінних умов, що здатні забезпечити найкращі рішення в реальному часі. Використання критеріїв оптимізації для роботи алгоритму може значно підвищити ефективність планування шляху.

Висновки. Дослідження та розробка Автономних надводних суден продовжується і надалі. Зацікавленість у подібних суднах зумовлена широкими можливостями, які дозволяють застосувати їх у різних дослідницьких місцях. Автономний рух – важлива особливість, яка розширює функціонал та робить АНС серйозним інструментом для роботи у різних умовах. Враховуючи викладене, можна зробити висновок, що ефективний рух АНС під час виконання завдань – це комплексний процес, в основі якого лежить злагоджена робота навігаційної системи, правильно спланований маршрут та врахування зовнішніх факторів впливу.

У статті проведено огляд методів навігації та особливостей руху АНС, основних структурних елементів та систематизовано основні проблеми та виклики, які наразі існують. Також проведений аналіз процесу планування шляху АНС як важливого етапу, який лежить в основі руху АНС за заданим маршрутом. Досліджено важливий аспект планування шляху, а саме алгоритми оптимізованого руху як шлях підвищення ефективності руху. На основі дослідження було сформовано критерії оптимальності, урахування яких у роботі алгоритму дасть змогу покращити будівництво шляху та покращить загальну ефективність під час переміщення АНС. Розвиток алгоритмів оптимізованого руху дозволяє забезпечити гнучкість та адаптивність до змінних умов, що здатні забезпечити найкращі рішення в реальному часі. Подальше дослідження та впровадження алгоритмів оптимізації руху АНС відкриває нові перспективи для створення повністю автономних засобів нового покоління.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mahley J., Development of the autonomous surface craft “ACES”. Massachusetts Institute of Technology, Department of Ocean Engineering Sea Grant College Program Cambridge, C. 827. doi: 10.1109/ OCEANS. 1997.624102.
2. Roberts, G.N. & Sutton, Rhondasutton. (2006). Advances in Unmanned Marine Vehicles. 10.1049/PBCE069E.
3. Rasal, Ketan, Navigation & control of an automated SWATH surface vessel for bathymetric mapping. 2013. Santa Clara University. Mechanical Engineering.
4. Bertram, V. (2008). Unmanned surface vehicles—A survey. In Proceedings of Skibsteknisk Selskab, Copenhagen, Denmark.
5. Murphy, R. R., Steimle, E., Griffin, C., Cullins, C., Hall, M., & Pratt, K. (2008). Cooperative use of unmanned sea surface and micro aerial vehicles at Hurricane Wilma. *Journal of Field Robotics*, 25(3), 164–180.
6. Peng, Y., J.D. Han and QJ Huang. Adaptive UKF Based Tracking Control for Unmanned Trimaran Vehicles. 2008.
7. Naeem, W., Xu, T., Sutton, R., & Tiano, A. (2008b). The design of a navigation, guidance, and control system for an unmanned surface vehicle for environmental monitoring. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 222(2), 67–79.
8. Larson, J., Bruch, M., & Ebken, J. (2006). Autonomous navigation and obstacle avoidance for unmanned surface vehicles. In Defense and Security Symposium (pp. 623007–623007). International Society for Optics and Photonics.
9. Wolf, M. T., Assad, C., Kuwata, Y., Howard, A., Aghazarian, H., Zhu, D., Huntsberger, T. (2010). 360-degree visual detection and target tracking on an autonomous surface vehicle. *Journal of Field Robotics*, 27(6), 819–833.
10. Gal, Oren & Zeitouni, Eran. (2013). Tracking Objects Using PHD Filter for USV Autonomous Capabilities. 10.1007/978-3-642-33084-1_1.
11. Marco Bibuli, Gabriele Bruzzone, Massimo Caccia, Lionel Lapierre. Path-Following Algorithms and Experiments for an Unmanned Surface Vehicle. *Journal of Field Robotics*, 2009, 26, pp. 669–688. ff10.1002/rob.20303ff. fffhal-00733789f.
12. Ma’arif, Alfian & Wahyunggoro, Oyas & Imam, Adha. 2019. Artificial Potential Field Algorithm Implementation for Quadrotor Path Planning. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 10.10.14569/IJACSA.2019.0100876.
13. Dale, Lucia, Amato, Nancy. 2001. Probabilistic roadmaps – Putting it all together. Proceedings – IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2. 1940–1947 vol. 2.
14. Dijkstra, E.W. A note on two problems in connexion with graphs. 1959. *Numer. Math.* 1, 269–271.

15. M. Noto and H. Sato. A method for the shortest path search by extended Dijkstra algorithm. *Smc 2000 conference proceedings.*, Nashville, TN, USA, 2000, pp. 2316-2320 vol.3, doi: 10.1109/ICSMC.2000.886462.
16. S. M. LaValle, *Rapidly-Exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning*, Technical Report. 98-11.
17. Khatib, O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. 1986. O. Khatib. *Autonomous robot vehicles*. Springer, 396–404.
18. Borenstein, Johann, Koren. 1991. The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots. *IEEE Trans. Robotics Autom.* 7 278-288.
19. K.N. McGuire, G.C.H.E. de Croon, K. Tuyls, A comparative study of bug algorithms for robot navigation, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol 121, 2019, 103261, ISSN 0921-8890.
20. G. Casalino, A. Turetta and E. Simetti. A three-layered architecture for real time path planning and obstacle avoidance for surveillance USVs operating in harbour fields. *OCEANS 2009-EUROPE*, Bremen, Germany, 2009, pp. 1–8, doi: 10.1109/OCEANSE.2009.5278104.

REFERENCES

1. Mahley J., Development of the autonomous surface craft “ACES”. Massachusetts Institute of Technology, Department of Ocean Engineering Sea Grant College Program Cambridge, C. 827. doi:10.1109/ OCEANS. 1997.624102.
2. Roberts, G.N. & Sutton, Rhondasutton. (2006). *Advances in Unmanned Marine Vehicles*. 10.1049/PBCE069E.
3. Rasal, Ketan, *Navigation & control of an automated SWATH surface vessel for bathymetric mapping*. 2013. Santa Clara University. Mechanical Engineering
4. Bertram, V. (2008). *Unmanned surface vehicles—A survey*. In *Proceedings of Skibsteknisk Selskab*, Copenhagen, Denmark
5. Murphy, R. R., Steimle, E., Griffin, C., Cullins, C., Hall, M., & Pratt, K. (2008). Cooperative use of unmanned sea surface and micro aerial vehicles at Hurricane Wilma. *Journal of Field Robotics*, 25(3), 164-180
6. Peng, Y., J.D. Han and QJ Huang. Adaptive UKF Based Tracking Control for Unmanned Trimaran Vehicles. 2008.
7. Naeem,W., Xu, T., Sutton, R., & Tiano, A. (2008b). The design of a navigation, guidance, and control system for an unmanned surface vehicle for environmental monitoring. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 222(2), 67–79.
8. Larson, J., Bruch, M., & Ebken, J. (2006). Autonomous navigation and obstacle avoidance for unmanned surface vehicles. In *Defense and Security Symposium* (pp. 623007–623007). International Society for Optics and Photonics
9. Wolf, M. T., Assad, C., Kuwata, Y., Howard, A., Aghazarian, H., Zhu, D., Huntsberger, T. (2010). 360-degree visual detection and target tracking on an autonomous surface vehicle. *Journal of Field Robotics*, 27(6), 819–833.

10. Gal, Oren & Zeitouni, Eran. (2013). Tracking Objects Using PHD Filter for USV Autonomous Capabilities. 10.1007/978-3-642-33084-1_1.
11. Marco Bibuli, Gabriele Bruzzone, Massimo Caccia, Lionel Lapierre. Path-Following Algorithms and Experiments for an Unmanned Surface Vehicle. *Journal of Field Robotics*, 2009, 26, pp. 669–688. [ff10.1002/rob.20303](https://doi.org/10.1002/rob.20303)[ff.fhal-00733789f](https://doi.org/10.1002/rob.20303)
12. Ma'arif, Alfian & Wahyunggoro, Oyas & Imam, Adha. 2019. Artificial Potential Field Algorithm Implementation for Quadrotor Path Planning. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 10.10.14569/IJACSA.2019.0100876.
13. Dale, Lucia, Amato, Nancy. 2001. Probabilistic roadmaps – Putting it all together. *Proceedings – IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2. 1940–1947. vol. 2.
14. Dijkstra, E.W. A note on two problems in connexion with graphs. 1959. *Numer. Math.* 1, 269–271.
15. M. Noto and H. Sato, "A method for the shortest path search by extended Dijkstra algorithm," *Smc 2000 conference proceedings.*, Nashville, TN, USA, 2000, pp. 2316–2320. vol. 3, doi: 10.1109/ICSMC.2000.886462.
16. S. M. LaValle, *Rapidly-Exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning*, Technical Report. 98-11.
17. Khatib, O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. 1986. O. Khatib. *Autonomous robot vehicles*. Springer, c. 396–404.
18. Borenstein, Johann, Koren. 1991. The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots. *IEEE Trans. Robotics Autom.* 7 278–288.
19. K.N. McGuire, G.C.H.E. de Croon, K. Tuyls, A comparative study of bug algorithms for robot navigation, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 121, 2019, 103261, ISSN 0921-8890.
20. G. Casalino, A. Turetta and E. Simetti, "A three-layered architecture for real time path planning and obstacle avoidance for surveillance USVs operating in harbour fields," *OCEANS 2009-EUROPE*, Bremen, Germany, 2009, pp. 1–8, doi: 10.1109/OCEANSE.2009.5278104.

**ЕФЕКТИВНІСТЬ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ
СУДНОВОГО ДВИГУНА ІЗ СИСТЕМОЮ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ
ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ЕЖЕКТОРНОЮ ТА АБСОРБЦІЙНОЮ
ХОЛОДИЛЬНИМИ МАШИНАМИ**

М.А. Пирисунько¹, А.А. Андрєєв², Д.О. Шалапко³

¹к.т.н., доцент кафедри суднового машинобудування та енергетики,
Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-3928-7112

²к.т.н., професор, завідувач кафедри суднового машинобудування та енергетики,
Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-1095-0398

³к.т.н., доцент кафедри суднового машинобудування та енергетики,
Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-4311-3908

Анотація

Вступ. Одним із основних джерел інтенсивного забруднення повітря є дизельні двигуни внутрішнього згоряння. З відпрацьованими газами у навколишнє середовище вони викидають велику кількість шкідливих речовин. Це не може не мати негативного впливу на екологічну обстановку в районах акваторій, ремонтних баз, портів, на тваринний і рослинний світ водоєм і на здоров'я людей. Зменшення токсичності та кількості шкідливих викидів є складною науково-технічною проблемою. Нормативні вимогами, які стають дедалі жорсткішими, диктують необхідність вирішення цих проблем. Найчастіше їх вирішення супроводжується зниженням енергетичних та економічних показників двигунів. Застосування системи рециркуляції відпрацьованих газів призводить до погіршення паливної ефективності двигуна насамперед через зниження температури робочого циклу та уповільнення процесу згоряння. Наявність в системі рециркуляції скрубера призводить до втрат енергії, оскільки він відводить теплоту рециркуляційних газів за борт. **Мета.** Метою дослідження є покращення енергетичних і екологічних показників енергетичної установки судна. **Результати.** За допомогою проведеного аналізу запропоновано підхід до підвищення енергетичної та екологічної ефективності суднової енергетичної установки. Це досягається за рахунок охолодження повітря на вході в двигун за допомогою циклічних повітряних охолоджувачів. Виправдано використання теплоти рециркуляційних і вихлопних газів. Це дозволяє компенсувати втрати енергії, які викликані системою рециркуляції відпрацьованих газів, а також дає змогу забезпечити подальше зниження витрати палива. У роботі приведено результати аналізу ефекту, який ми отримуємо шляхом охолодження повітря на вході в турбокомпресор дизельного двигуна

тепловикористовуючими холодильними машинами, які утилізують теплоту рециркуляційних і вихлопних газів. **Висновки.** Показано, що питому витрату палива дизельного двигуна можна знизити шляхом охолодження наддувного повітря в абсорбційних і ежекторних холодильних машинах.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння, абсорбційна холодильна машина, ежекторна холодильна машина, витрата палива, рециркуляція відпрацьованих газів, екологія, енергетична ефективність.

EFFICIENCY OF AIR COOLING AT THE INLET OF A MARINE ENGINE WITH AN EXHAUST GAS RECIRCULATION SYSTEM BY EJECTOR AND ABSORPTION REFRIGERATION MACHINES

M.A. Pyrysunko¹, A.A. Andreiev², D.O. Shalapko³

¹Ph.D. (Engineering), Associate Professor at the Department of Ship Engineering and Power Engineering,
Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-3928-7112

²Ph.D. (Engineering), Professor, Head of the Department of Ship Engineering and Power Engineering,
Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-1095-0398

³Ph.D. (Engineering), Associate Professor at the Department of Ship Engineering and Power Engineering,
Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-4311-3908

Summary

Introduction. One of the main sources of intense air pollution is diesel internal combustion engines. With exhaust gases, they emit a large amount of harmful substances into the environment. Which cannot but have a negative impact on the ecological situation in the areas of water areas, repair depots, ports, on the flora and fauna of reservoirs and on human health. Reducing toxicity and the amount of harmful emissions is a complex scientific and technical problem. Regulatory requirements, which are tightening, dictate the need to address these problems. More often, their solution is accompanied by a decrease in the energy and economic performance of engines. The use of an exhaust gas recirculation system leads to a deterioration in the fuel efficiency of the engine, primarily due to a decrease in the operating cycle temperature and a slowdown in the combustion process. The presence of a scrubber in the recirculation system leads to energy losses, since it removes heat from the recirculation gases overboard. **Purpose.** The aim of the study is to improve the energy and environmental performance of the ship's power plant. **Results.** Through the analysis, an approach is proposed to improve the energy and environmental efficiency of a ship power plant. This is achieved by cooling the engine inlet air with cyclic air coolers. The use of heat from recirculation and exhaust gases is justified. This makes it possible to compensate for the energy losses caused by the exhaust gas recirculation system, and also provides a further reduction

in fuel consumption. The paper presents the results of an analysis of the effect that we obtain by cooling the air at the inlet to the turbocharger of a diesel engine with heat-using refrigeration machines that utilize the heat of recirculation and exhaust gases.

Conclusions. *It is shown that the fuel consumption of a diesel engine can be reduced by cooling the charge air in absorption and ejector chillers.*

Key words: *internal combustion engine, absorption refrigeration machine, ejector refrigeration machine, fuel consumption, exhaust gas recirculation, ecology, energy efficiency.*

Вступ. У наш час проблема забруднення атмосфери стоїть дуже гостро. Шкідливі речовини, що містяться в атмосферному повітрі, негативно впливають на навколишнє середовище і на життєдіяльність людини. Серед основних джерел забруднення навколишнього середовища з суден виділяються головні та допоміжні енергетичні установки.

Міжнародні конвенції встановлюють жорсткі вимоги до технічного стану суден і процесу їх експлуатації. Недотримання цих норм під час експлуатації судна може призвести до обмеження їх району плавання або заборонення їх експлуатації в адміністративному порядку [1; 2]. Із 2016 року були введені нові стандарти ІМО ТIER III. Відповідно до них, у регульованих зонах (ЕСА) кількість шкідливих викидів має бути зменшена більш ніж у 3 рази.

Постановка проблеми. Вибір способу поліпшення екологічності суднового двигуна завжди супроводжується пошуком компромісу між димністю, токсичністю, витратами на реалізацію способу та паливною економічністю. Серед популярних методів поліпшення екологічності суднового дизеля є такі, як використання водопаливних емульсій, каталітичне очищення відпрацьованих газів, зволоження наддувного повітря, організація робочих процесів, застосування природного газу, рециркуляція відпрацьованих газів тощо.

Одним із перспективних напрямів екологізації суднових двигунів є протидія шкідливим речовинам шляхом їх рециркуляції. У цьому випадку відпрацьовані гази очищаються в скруберах, а їх теплота відводиться морською водою. Після цього очищені вихлопні гази разом із наддувним повітрям після турбокомпресора подаються назад у циліндри двигуна (технологія EGR) [3].

Слід зазначити, що використання таких технологій супроводжується додатковими витратами енергії на циркуляцію газів і тепловтратами з морською водою, що призводить до збільшення витрати палива і зниження потужності двигуна. Водночас охолодження наддувного повітря двигунів забезпечило б зниження витрати палива. Можливість використання теплоти рециркуляційних (екологічних) газів, яка скидається за борт, також дає можливість зменшити витрати енергії на їх рециркуляцію та очищення з одночасним зменшенням шкідливих викидів [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні є перспективні методи та технології, що дозволяють підвищити енергетичну та паливну ефективність двигунів внутрішнього згоряння із системами EGR [5]. Вони можуть поєднувати високу екологічну ефективність з паливною економічністю двигуна, яка досягається за рахунок глибокої утилізації відхідної теплоти [6] та циклічного повітряного охолодження дизеля з використанням холодильної машини, тригенерації або

комплексних енергетичних систем і струменевих технологій [7; 8], статистичної обробки даних та аналізу впливу кліматичних параметрів навколишнього середовища на експлуатаційні характеристики систем охолодження. Для оцінки ефективності технологій зниження шкідливих викидів у атмосферу та економії палива використовуються методи та моделювання впливу параметрів навколишнього середовища на працездатність систем охолодження з утилізацією відпрацьованої теплоти, проводяться спостереження та експерименти. Представлені технології та методи дозволяють охолоджувати повітря, що надходить у двигун, за рахунок теплоти, яка відходить, за рахунок використання холодильних машин.

Формулювання цілей статті. Метою наукового дослідження є підвищення екологічної та енергетичної ефективності суднової енергетичної установки шляхом охолодження циркуляційного повітря в ежекторній холодильній машині (ЕХМ) і вихлопних газів у абсорбційній холодильній машині (АБХМ).

Виклад основного матеріалу. Для розрахунку ефекту повітряного охолодження на вході було обрано суховантажне судно, до складу якого входить судновий двигун провідної двигунобудівної компанії «MAN Energy» [9; 10]. Двигун 6G50ME-C9.6-TIII: дизельний, малообертовий і має такі характеристики: потужність $N_e = 9288$ кВт (NMCR=90%), питома витрата палива $g_e = 165,8$ г/(кВт·годину). Встановлена система рециркуляції відпрацьованих газів, яка відповідає нормам Tier III і зменшує викиди.

Характеристики холоду, необхідного для охолодження повітря на вході в двигун, залежить від кліматичних умов на лінії рейсу [11]. Для розрахунку показників двигуна був обраний маршрут від порту Одеса (Україна) до порту Шанхай (Китай). Тривалість маршруту 24 дні (з 01.07.2018 р. по 24.07.2018 р.), протяжність $L = 15023$ км. На рис. 1 наведено параметри кліматичних умов (температура морської води $t_{3.в}$, відносна вологість φ_n і температура зовнішнього повітря t_n) під час плавання [12; 13].

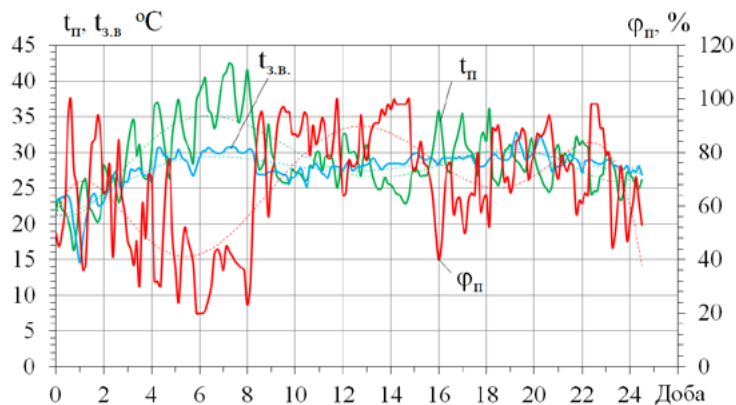


Рис. 1. Зміна відносної вологості φ_n і температури зовнішнього повітря t_n , а також температури морської води $t_{3.в}$ під час рейсу

Теплота відпрацьованих газів, необхідна для нагріву конденсату і утворення пари, розраховується з урахуванням масової витрати відпрацьованих газів

$G_{вг}$, їхньої теплоємності $c_{вг}$ і температури відпрацьованих газів на вході $t_{вг1}$ і на виході $t_{вг2}$:

$$Q_{г,вг} = G_{вг} \cdot c_{вг} \cdot \Delta t_{вг} = G_{вг} \cdot c_{вг} \cdot (t_{вг1} - t_{вг2}). \quad (1)$$

Теплота рециркуляційних (екологічних) газів розраховується з урахуванням масової витрати рециркуляційних газів $G_{пр}$, їхньої теплоємності $c_{пр}$ і температури рециркуляційних газів на вході $t_{пр1}$ і на виході $t_{пр2}$ з генератора:

$$Q_{г,пр} = G_{пр} \cdot c_{пр} \cdot \Delta t_{пр} = G_{пр} \cdot c_{пр} \cdot (t_{пр1} - t_{пр2}). \quad (2)$$

Зміна кліматичних умов під час рейсу приводить до зміни теплового навантаження системи охолодження двигуна, холодопродуктивності Q_0 , необхідної для охолодження повітря на вході в двигун (від температури в машинному відділенні $t_{мв}$ до температури, наприклад $t_{п2} = 15^\circ\text{C}$) на Δt_{15} , та необхідного для рекуперації теплоти холодильною машиною споживання теплоти:

$$Q_{г} = Q_0 / \zeta. \quad (3)$$

Спільне використання ЕХМ і АБХМ може бути раціональним вирішенням обговорюваних питань. Доцільно використовувати переваги кожної з тепловикористовуючих холодильних машин. Використання ЕХМ вигідне, оскільки вони конструктивно простіші, складаються переважно з теплообмінників. Вони легко встановлюються на бортах і перегородках, в рефрижераторних і машинних відділеннях. Також доцільно використовувати високоефективні АБХМ, оскільки вони мають високий термічний коефіцієнт $\zeta = 0,6 \dots 0,7$.

Результати. На рис. 2 представлена розроблена схема охолодження повітря на вході суднового двигуна в АБХМ і рециркуляційних газів у ЕХМ. Це можливо за рахунок утилізації теплоти вихлопних і рециркуляційних (екологічних) газів.

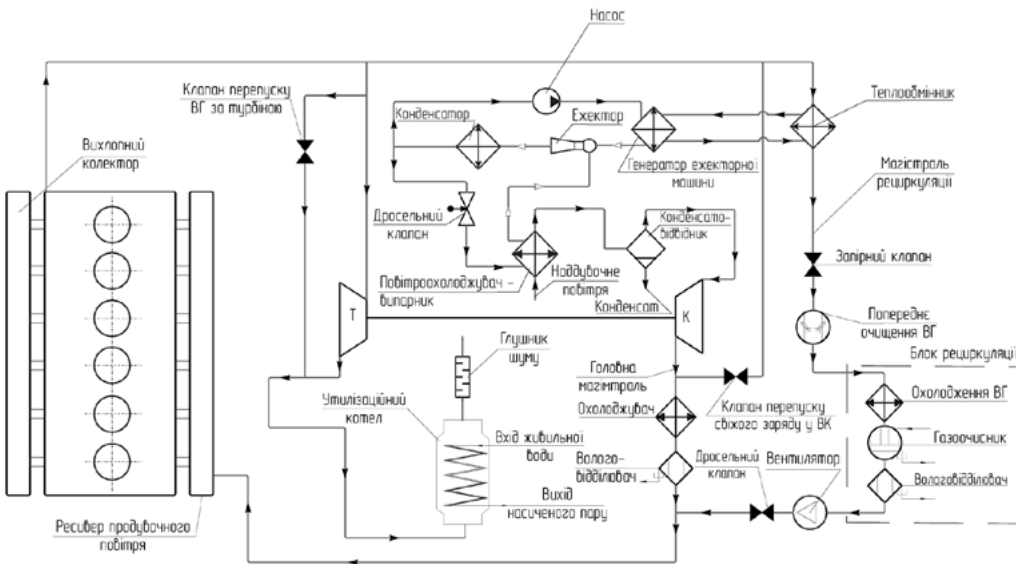


Рис. 2. Розроблена схема охолодження повітря на вході суднового двигуна в АБХМ і рециркуляційних газів у ЕХМ

Зниження температури повітря на вході в двигун шляхом утилізації теплоти рециркуляційних газів у ЕХМ (з тепловими коефіцієнтами $\zeta=0,2; 0,3$) і вихлопних газів в АБХМ (з тепловим коефіцієнтом $\zeta=0,6$) дозволяє знизити питому витрату палива (рис. 3).

Застосування такої схеми зменшує питому витрату палива. Кількісний ефект залежить від значень теплових коефіцієнтів ЕХМ і АБХМ.



Рис. 3. Поточні значення питомої витрати палива базового двигуна з рециркуляцією газів $g_{e,pr}$, питомої витрати палива двигуном при охолодженні повітря на вході в двигун за рахунок рекуперації теплоти вихлопних газів у АБХМ ($\zeta=0,6$) і рециркуляційних газів у ЕХМ ($\zeta=0,2; 0,3$) під час рейсу

Питомі витрати палива при зниженні температури повітря на вході в судновий двигун за рахунок утилізації теплоти відпрацьованих (екологічних) газів у ЕХМ (з тепловими коефіцієнтами $\zeta=0,2; 0,3$) і вихлопних газів у АБХМ (з тепловими коефіцієнтами $\zeta=0,7$) становить (рис. 4): $g_{e,pr(0,2)+ABGM(0,7)} = 164,3 \dots 168,2$ г/(кВт·годину) ($\zeta=0,2$); $g_{e,pr(0,3)+ABGM(0,7)} = 164,0 \dots 168,1$ г/(кВт·годину) ($\zeta=0,3$).

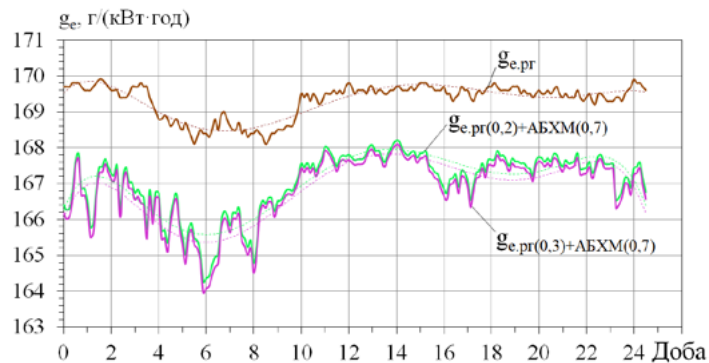


Рис. 4. Поточні значення питомої витрати палива базового двигуна з рециркуляцією газів $g_{e,pr}$, питомої витрати палива двигуном при охолодженні повітря на вході в двигун за рахунок рекуперації тепла вихлопних газів у АБХМ ($\zeta=0,7$) і рециркуляційних газів у ЕХМ ($\zeta=0,2; 0,3$) під час рейсу

Зниження температури повітря на вході в двигун за рахунок утилізації теплоти рециркуляційних (екологічних) газів у ЕХМ (з тепловими коефіцієнтами $\zeta=0,2; 0,3$)

і вихлопних газів у АБХМ (з тепловими коефіцієнтами $\zeta = 0,6; 0,7$) дозволяє збільшити загальну економію палива за рейс (рис. 5): $\Sigma B_{n(0,2)+ABXM(0,6)} = 11,0$ т (в ЕХМ $\zeta = 0,2$, в АБХМ $\zeta = 0,6$); $\Sigma B_{n(0,3)+ABXM(0,6)} = 11,9$ т (в ЕХМ $\zeta = 0,3$, в АБХМ $\zeta = 0,6$); $\Sigma B_{n(0,2)+ABXM(0,7)} = 12,5$ т (в ЕХМ $\zeta = 0,2$, в АБХМ $\zeta = 0,7$); $\Sigma B_{n(0,3)+ABXM(0,7)} = 13,5$ т (в ЕХМ $\zeta = 0,3$, в АБХМ $\zeta = 0,7$).

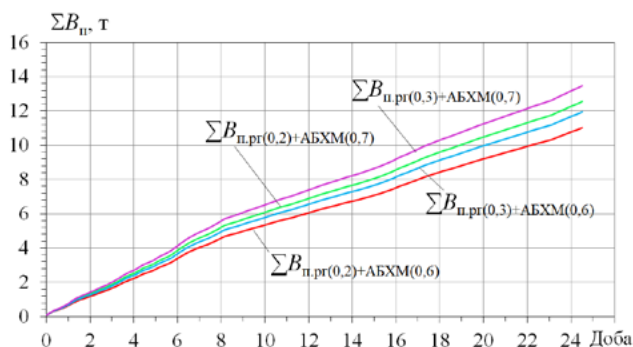


Рис. 5. Загальна економія палива за рейс $\Sigma B_{n(0,2)+ABXM(0,6)}$, $\Sigma B_{n(0,3)+ABXM(0,6)}$, $\Sigma B_{n(0,2)+ABXM(0,7)}$ та $\Sigma B_{n(0,3)+ABXM(0,7)}$ за рахунок повітряного охолодження на вході в двигун шляхом утилізації теплоти відпрацьованих газів у АБХМ ($\zeta = 0,6; 0,7$) і рециркуляційних газів у ЕХМ ($\zeta = 0,2; 0,3$)

Із рис. 5 видно, що система повітряного охолодження на вході в судновий двигун при утилізації відпрацьованих газів у АБХМ ($\zeta = 0,7$) і рециркуляційних газів у ЕХМ ($\zeta = 0,3$) є більш ефективною.

Нині ціни на високов'язке («важке») паливо зростають. Вартість палива IFO 380 для суднових двигунів становить 505 доларів США/т [14]. Протягом року судно може здійснити до 12 рейсів між портами Одеса та Шанхай.

При охолодженні повітря на вході в двигун за рахунок утилізації теплоти відпрацьованих газів у АБХМ ($\zeta = 0,6$) і рециркуляційних газів у ЕХМ ($\zeta = 0,2; 0,3$) річна економія палива становить: $\Delta B_{п(0,2+0,6)} = 126,1$ т, $\Delta B_{п(0,3+0,6)} = 137,7$ т.

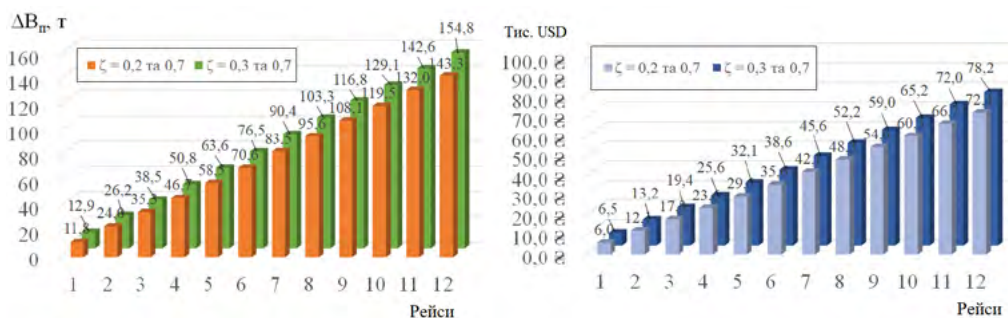


Рис. 6. Загальна величина зниження витрати палива на 1...12 рейсів Одеса-Шанхай (12 рейсів на рік) за рахунок повітряного охолодження на вході в двигун шляхом утилізації теплоти відпрацьованих газів у АБХМ ($\zeta = 0,7$) і рециркуляційних газів у ЕХМ: а – $\zeta = 0,2$; б – $\zeta = 0,3$

При охолодженні повітря на вході в двигун за рахунок утилізації теплоти відпрацьованих газів у АБХМ ($\zeta = 0,7$) і рециркуляційних газів у ЕХМ ($\zeta = 0,2; 0,3$) річна економія палива (рис. 6, а і б) становить: $\Delta B_{п(0,2+0,7)} = 143,3$ т, $\Delta B_{п(0,3+0,7)} = 154,8$ т. Найбільша річна економія при спільному охолодженні повітря на вході в двигун за рахунок утилізації теплоти рециркуляційних (екологічних) газів у ЕХМ і вихлопних газів у АБХМ становить 78,2 тис. доларів США (ЕХМ $\zeta = 0,3$ і АБХМ $\zeta = 0,7$).

Використання системи рециркуляції відпрацьованих газів зі ступенем рециркуляції $K_r = 30\%$ зменшує кількість шкідливих викидів. У першу чергу це стосується NO_x і SO_x і становить (рис. 7): $\Delta g_{NO_x} = 10,2 \dots 10,6$ г/(кВт·годину); $\Delta g_{SO_x} = 2,2 \dots 2,4$ г/(кВт·годину).

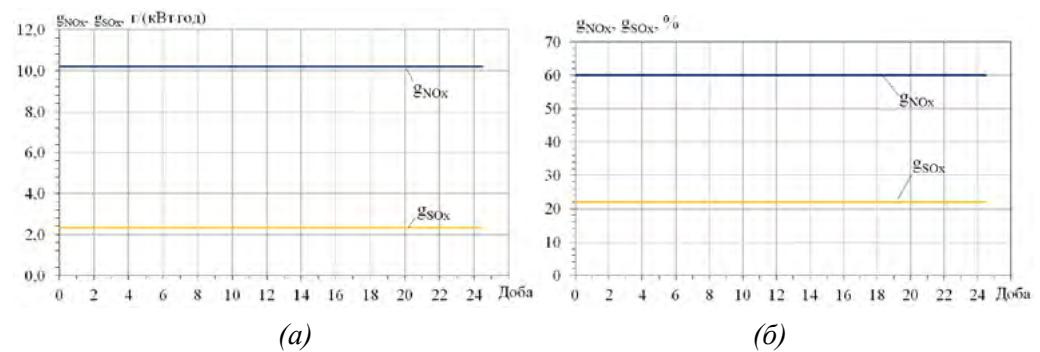


Рис. 7. Абсолютні (а) та процентні (б) значення скорочення викидів NO_x і SO_x при охолодженні повітря в тепловикористовуючих холодильних машинах під час рейсу судна при коефіцієнті рециркуляції $K_r = 30\%$

Розроблене схемне рішення системи циклічного повітряного охолодження двигуна дозволяє реалізувати методи узгодженої організації процесів трансформації теплоти та охолодження з урахуванням змінних під час рейсу зовнішніх параметрів.

Висновки. Комбіноване використання абсорбційних і ежекторних холодильних машин дає можливість раціоналізувати процеси охолодження на вході в двигун з різною ефективністю перетворення теплоти в холод. При цьому використовують переваги різних типів тепловикористовуючих холодильних машин: просту конструкцію і можливість поелементного розміщення ЕХМ в машинному відділенні (теплообмінники по бортах і на платформах) з низькими тепловими коефіцієнтами близько 0,3, й у той самий час високий ККД теплоперетворення (теплові коефіцієнти 0,6...0,7) в моноблочних АБХМ, що потребують окремих приміщень.

Більш ефективною є утилізація відпрацьованих газів системою повітряного охолодження повітря, що надходить у двигун, в АБХМ ($\zeta = 0,7$) і рециркуляційних газів у ЕХМ ($\zeta = 0,3$). У цьому випадку питома витрата палива $g_{e,п(0,3)+АБХМ(0,7)} = 164,0 \dots 168,1$ г/(кВт·годину). Річна економія палива становить: $\Delta B_{п(0,3+0,7)} = 154,8$ т. Найбільша річна економія при спільному охолодженні повітря на вході в двигун за рахунок утилізації теплоти рециркуляційних (екологічних) газів у ЕХМ ($\zeta = 0,3$) і вихлопних газів у АБХМ ($\zeta = 0,7$).

Також це дозволяє підвищити екологічну енергоефективність суднової енергетичної установки: зменшити викиди NOX на 60%, SOX – на 21%.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kumar J., Thirumala S. Effect of reformed EGR on the performance and emissions of a diesel engine: A numerical study. *Alexandria Engineering Journal*. 2018. No 57, pp. 517–525. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.01.008>.
2. MARPOL Consolidated edition 2020. URL: http://www.idgca.org/doc/app5_290115.pdf, last accessed 2020/04/10.
3. Nag S., Sharma P., Gupta A., Dhar A. Experimental study of engine performance and emissions for hydrogen diesel dual fuel engine with exhaust gas recirculation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44, No 23, pp. 12163–12175. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.120>.
4. Радченко Р.М., Пирисунько М.А. Метод рециркуляції відпрацьованих газів суднових дизелів для зменшення їх токсичності. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2018. Vol. 54, No 4. pp. 11–16, Doi:10.15673/ret.v54i4.1215.
5. Pyrysunko M., Radchenko A., Tkachenko V. Marine Diesel Engine Inlet Air Cooling by Ejector Chiller on the Vessel Route Line. In: Ivanov, V., Pavlenko, I., Liaposhchenko, O., Machado, J., Edl, M. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. DSMIE. 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-06044-1_25.
6. Trushliakov E., Radchenko A., Radchenko M. The Efficiency of Refrigeration Capacity Regulation in the Ambient Air Conditioning Systems. In: Ivanov, V., Pavlenko, I., Liaposhchenko, O., Machado, J., Edl, M. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE. 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50491-5_33.
7. Konovalov D., Radchenko M., Kobalava H. Increasing Ecological and Energy Efficiency of Combustion Engines by Using a Thermopressor. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. 2021. ICTM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 367. Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_40.
8. Konovalov D., Kobalava H., Radchenko M. Determination of hydraulic resistance of the aerothermopressor for gas turbine cyclic air cooling. In: *TE-RE-RD. 2020, E3S Web of Conferences 180, 0101231*. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018001012>.
9. MAN Diesel & Turbo. MAN B&W Two-stroke Marine Engines. Emission Project Guide. URL: https://marine.man-es.com/applications/projectguides/2stroke/con-tent/special_pg/7020-0145-09_uk.pdf, last accessed 2019/06/22.

10. MAN Diesel Turbo. CEAS Engine Calculations. URL: <https://marine.man-es.com/two-stroke/ceas>, last accessed 2019/06/22.
11. Radchenko R., Pyrysunko M., Kornienko V. Effect of Utilization Exhaust and Recirculation Gases of Ship Diesel Engine in Absorption Chiller. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2021. ICTM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 367. Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_43.
12. METEOMANZ. URL: <http://meteomanz.com>, last accessed 2021/12/21.
13. NOAA's. URL: <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/datawodgeo.html>, last accessed 2021/12/16.
14. Ship & Bunker. URL: <https://shipandbunker.com/prices#VLSFO>, last accessed 2020/04/10.

REFERENCES

1. Kumar, J., Thirumala, S. (2018). Effect of reformed EGR on the performance and emissions of a diesel engine: A numerical study. *Alexandria Engineering Journal*. 57, 517–525. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.01.008>
2. MARPOL Consolidated edition 2020, http://www.idgca.org/doc/app5_290115.pdf, last accessed 2020/04/10.
3. Nag, S., Sharma, P., Gupta, A., Dhar, A. (2019). Experimental study of engine performance and emissions for hydrogen diesel dual fuel engine with exhaust gas recirculation. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 44, 23, 12163–12175. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.120>
4. Radchenko, R.M., Pyrysunko, M.A. (2018). Metod retsyrukuliatsii vidpratsovanykh haziv sudnovykh dyzeliv dlia zmeshennia yikh toksychnosti. *Refrigeration Engineering and Technology*, Vol. 54, 4, 11-16, doi:10.15673/ret.v54i4.1215 [in Ukrainian].
5. Pyrysunko, M., Radchenko, A., Tkachenko, V., Zubarev, A., Andreev, A. (2022). Marine Diesel Engine Inlet Air Cooling by Ejector Chiller on the Vessel Route Line. In: Ivanov, V., Pavlenko, I., Liaposhchenko, O., Machado, J., Edl, M. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. DSMIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06044-1_25
6. Trushliakov, E., Radchenko, A., Radchenko, M., Kantor, S., Zielikov, O. (2020). The Efficiency of Refrigeration Capacity Regulation in the Ambient Air Conditioning Systems. In: Ivanov, V., Pavlenko, I., Liaposhchenko, O., Machado, J., Edl, M. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50491-5_33
7. Konovalov, D., Radchenko, M., Kobalava, H., Pyrysunko, M., Andreev, A. (2022). Increasing Ecological and Energy Efficiency of Combustion Engines by Using a Thermopressor. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2021. ICTM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 367. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_40

8. Konovalov, D., Kobalava, H., Radchenko, M., Scurtu, I.C., Radchenko, R. (2020). Determination of hydraulic resistance of the aerothermopressor for gas turbine cyclic air cooling. In: TE-RE-RD 2020, E3S Web of Conferences 180, 0101231. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018001012>
9. MAN Diesel & Turbo. MAN B&W Two-stroke Marine Engines. Emission Project Guide, https://marine.man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/special_pg/7020-0145-09_uk.pdf, last accessed 2019/06/22
10. MAN Diesel Turbo. CEAS Engine Calculations, <https://marine.man-es.com/two-stroke/ceas>, last accessed 2019/06/22
11. Radchenko, R., Pyrysunko, M., Kornienko, V., Gorbov, V., Kalinichenko, I. (2022). Effect of Utilization Exhaust and Recirculation Gases of Ship Diesel Engine in Absorption Chiller. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2021. ICTM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 367. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_43
12. METEOMANZ, <http://meteomanz.com>, last accessed 2021/12/21
13. NOAA's, <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/datawodgeo.html>, last accessed 2021/12/16
14. Ship & Bunker, <https://shipandbunker.com/prices#VLSFO>, last accessed 2020/04/10

**ВПЛИВ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ
ГОЛОВНОГО ДВИГУНА 9L48/60В ТАНКЕРА ВИКОРИСТАННЯ
ВОДНЕВИХ ДОБАВОК ДО ОСНОВНОГО ПАЛИВА**

Д.О. Шалапко¹, А.А. Андрєєв², М.А. Пирисунько³

¹к.т.н., доцент кафедри суднового машинобудування та енергетики,
Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-4311-3908

²к.т.н., професор, завідувач кафедри суднового машинобудування та енергетики,
Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-1095-0398

³к.т.н., доцент кафедри суднового машинобудування та енергетики,
Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-3928-7112

Анотація

Вступ. На сьогодні розвиток двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) досяг таких значень ККД, що кожен наступний відсоток збільшення ефективності потребує значних зусиль та наукових результатів. Для судових ДВЗ стає дедалі актуальніше використання утилізації вторинних енергоресурсів, альтернативних палив та паливних каталізаторів.

Мета. Провести моделювання модернізації паливної системи головного двигуна 9L48/60DB судна танкера з використанням водневих каталітичних добавок до основного палива для покращення експлуатаційних показників двигуна.

Результати. Для отримання позитивних результатів запропоновано використання системи подачі водневих добавок, що не перевищують 0,1% від циклової порції палива (за масою). Водень на судні можливо зберігати у вигляді металогідридного акумулятора, або в зрідженому стані. Виконано моделювання використання даної технології на двигуні MAN 9L48/60B. В результаті проведення розрахунків отримано зменшення питомої ефективної витрати палива двигуном на 1,5...3,5% залежно від режиму роботи двигуна, причому найбільші значення зменшення витрати палива досягається на часткових режимах роботи. Також варто відмітити збільшення потужності двигуна до 3% відповідно до експлуатаційного режиму роботи установки. При цьому ефект досягається за рахунок покращення сумішоутворення в двигуні. Використовуючи дану технологію, можна запобігти значному переобладнанню двигуна та паливної системи в цілому. При цьому отримання водню можливе як при бункеруванні судна, так і на режимах малого навантаження дизель-генераторів шляхом електролізу води. **Висновки.** Впровадження давнього науково-технічного рішення дозволить покращити експлуатаційні та економічні показники енергетичної установки судна танкера

з головним двигуном MAN 9L48/60B, збільшивши потужність та зменшивши витрату палива установкою. Проведення розрахунків по умовній рейсовій лінії протяжністю 5000 морських миль дозволяє говорити про економічний ефект в розмірі до 15...16 тис. у.о. за рейс з урахуванням витрат на водень.

Ключові слова: експлуатація СЕУ, двигун внутрішнього згоряння, водень, альтернативне паливо, металогібридний акумулятор.

INFLUENCE OF HYDROGEN ADDITIVES TO THE PRINCIPAL FUEL ON THE PERFORMANCE OF THE MAIN ENGINE OF THE 9L48/60B TANKER

D.O. Shalapko¹, A.A. Andreiev², M.A. Pyrysunko³

¹Ph.D. (Engineering), Associate Professor at the Department of Ship Engineering and Power Engineering,

Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-4311-3908

²Ph.D. (Engineering), Professor, Head of the Department of Ship Engineering and Power Engineering,

Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-1095-0398

³Ph.D. (Engineering), Associate Professor at the Department of Ship Engineering and Power Engineering,

Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-3928-7112

Summary

Introduction. To date, the development of internal combustion engines (ICE) has reached such values of efficiency that each subsequent percentage increase in efficiency requires significant efforts and scientific results. The utilization of secondary energy resources, alternative fuels and fuel catalysts is becoming more and more relevant for marine ICE.

Goal. To carry out modeling of the modernization of the fuel system of the main engine 9L48/60DB of the tanker vessel using hydrogen catalytic additives to the main fuel to improve the performance of the engine.

The results. In order to obtain positive results, it is proposed to use a system for supplying hydrogen additives, which do not exceed 0.1% of the cyclic portion of fuel (by mass). Hydrogen can be stored on board in the form of a metal hydride battery or in a liquid state. Simulation of the use of this technology on the MAN 9L48/60B engine was carried out. As a result of the calculations, a decrease in the specific effective fuel consumption of the engine by 1.5...3.5% was obtained, depending on the mode of operation of the engine, with the largest values of the reduction of fuel consumption being achieved in partial modes of operation. It is also worth noting the increase in engine power up to 3%, according to the operating mode of the installation. At the same time, the effect is achieved due to the improvement of mixture formation in the engine. Using this technology, it is possible to prevent a significant conversion of the engine and the fuel system as a whole. At the same time, obtaining hydrogen is possible both during ship bunkering and during low load modes of diesel generators by electrolysis of water.

Conclusions. *The implementation of an ancient scientific and technical solution will improve the operational and economic indicators of the energy installation of a tanker with a MAN 9L48/60B main engine, increasing the power and reducing the fuel consumption of the installation. Carrying out calculations along a conventional route with a length of 5,000 nautical miles allows us to talk about an economic effect in the amount of up to 15...16 thousand USD per trip including hydrogen costs.*

Key words: *ship power plant operation, internal combustion engine, hydrogen, alternative fuel, metal hydride battery.*

Вступ. Нафтові палива є невідновлюваним ресурсом, і, отже, є обмеженими. Прогнозована вичерпність нафтових запасів залежить від різних факторів, таких як технологічні зміни, витрати на розвідку та видобуток, а також споживання нафтових палив у світі.

Згідно з оцінками Міжнародної енергетичної агентства (МЕА), світові запаси нафти на початок 2021 року становили близько 1,7 трильйонів барелів. Проте швидкість видобутку нафти у світі продовжує зростати, а це може привести до того, що запаси будуть вичерпані у найближчі десятиліття.

З огляду на зростання світового населення та економіки попит на нафтові палива продовжує зростати. Тому уряди багатьох країн розвивають стратегії енергетичної безпеки, щоб забезпечити стале та безпечне забезпечення енергією. Ці стратегії включають розвиток альтернативних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія, а також використання енергоефективних технологій та енергозберігаючих заходів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тому вичерпність нафтових запасів є серйозною проблемою, яка потребує пошуку альтернативних джерел енергії та розробки нових технологій для забезпечення сталого та безпечного забезпечення енергією [1].

Передумови використання альтернативних палив у судових ДВЗР можуть бути різними і залежать від багатьох факторів [2]. Основні передумови можуть включати:

Екологічні вимоги: у зв'язку з ростом світового населення та збільшенням числа транспортних засобів, в тому числі і суден, зростає обсяг викидів забруднюючих речовин в атмосферу, що негативно впливає на довкілля. Використання альтернативних палив може зменшити викиди шкідливих речовин і сприяти збереженню довкілля.

Економічні фактори: залежно від ринкової кон'юнктури вартість різних видів палива може змінюватись. Використання альтернативних палив може бути вигіднішим з економічної точки зору в деяких обставинах, зокрема при зростанні цін на нафту.

Політичні фактори: деякі держави можуть сприяти використанню альтернативних палив, надаючи пільги чи знижуючи податки на такі види палива. Такі заходи можуть стимулювати розвиток виробництва та використання альтернативних палив.

Технологічні можливості: розвиток технологій дозволяє виробляти більш ефективні і екологічно чисті види альтернативних палив, що може стимулювати їх використання.

Соціальні фактори: зростаюча увага до екології та проблем забруднення навколишнього середовища може сприяти зростанню попиту на екологічно чисті види палива, в тому числі і для суден.

Існує багато альтернативних палив для двигунів, які можуть замінити нафтові палива та зменшити залежність від них. Ось кілька прикладів:

Біодизель: виготовляється з рослинної олії, такої як соя, рапс, пальмова олія, або відходів переробки жирів та олійних культур. Біодизель може використовуватися у дизельних двигунах без будь-яких модифікацій.

Етанол: виготовляється з різних джерел, таких як цукровий тростник, кукурудза та інші зернові культури. Етанол можна додавати до бензину у різних співвідношеннях.

Водень: може використовуватися як паливо для транспорту, особливо для великих транспортних засобів. При згорянні водень утворюється тільки вода, що робить його дуже чистим паливом [3].

Електрика: електромобілі стають все популярнішими, особливо з розвитком технологій батарей та зарядних станцій. Вони не потребують споживання нафти або інших палив, а їхні емісії є значно меншими порівняно з двигунами з внутрішнього згоряння.

Газ: природний газ, скраплений нафтовий газ та стиснутий природний газ можуть використовуватися як паливо для двигунів.

Біогаз: отримується з різних відходів, таких як органічні відходи, гноївка та інші відходи, які перероблюються в паливо.

Отже, існує багато альтернативних палив для двигунів, які можуть замінити нафтові палива та зменшити залежність від них.

Одним зі способів покращення експлуатаційних показників суднових двигунів виступають паливні добавки.

Паливні добавки для суднових двигунів можуть покращити якість палива та забезпечити більш ефективну роботу двигуна [4]. Ось кілька прикладів паливних добавок для суднових двигунів.

Додавання антифрикційних добавок: це може покращити мастильні властивості палива та захистити двигун від зношення. Такі добавки зменшують тертя між деталями двигуна та забезпечують більш тривалий термін експлуатації двигуна.

Додавання стабілізаторів: це може допомогти зберегти якість палива та запобігти його розкладу протягом тривалого зберігання. Такі добавки забезпечують стабільну якість палива під час його зберігання на судні.

Додавання антиоксидантів: це може допомогти запобігти розкладу палива від тепла та світла. Антиоксиданти допомагають зберігати якість палива та забезпечують більш тривалий термін його зберігання.

Додавання депозит-контролюючих добавок: це може допомогти запобігти утворенню накипу та інших відкладень у двигуні. Такі добавки забезпечують більш ефективну роботу двигуна та запобігають зменшенню його потужності [5].

Додавання антифрикційних добавок: це може покращити коефіцієнт тертя між деталями двигуна та забезпечити більш тривалий термін експлуатації двигуна. Антифрикційні добавки допомагають забезпечити більш ефективну роботу двигуна та зменшити зношення його деталей.

Ці паливні добавки можуть бути використані окремо або в комбінації одна з одною, залежно від необхідності [6].

Постановка проблеми. Якщо сумістити вищевказані пункти, серед альтернативних палив варто відзначити водень.

Використання водню в суднових двигунах є одним з можливих варіантів зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу та зменшення залежності від нафтових палив.

Основні переваги використання водню в суднових двигунах:

1) не викидає шкідливих речовин в атмосферу: водень при згорянні утворює водяну пару, тому його використання не викидає в атмосферу шкідливих газів, таких як вуглекислий газ та оксиди азоту;

2) екологічно чистий: водень відноситься до відновлюваних джерел енергії, тому його використання є екологічно чистим;

3) висока ефективність: водень має високу енергетичну щільність та може бути спалений з високою ефективністю, що дозволяє отримувати більше енергії з меншої кількості палива.

Однак використання водню в суднових ДВЗ також має свої виклики та обмеження:

– висока вартість: виробництво та зберігання водню потребують значних інвестицій та вартість водню є вищою в порівнянні з нафтовими паливами;

– складність зберігання: водень має дуже низьку густину та вимагає особливих умов зберігання та транспортування, що може бути складним та витратним;

– обмежена інфраструктура: інфраструктура для виробництва, зберігання та транспортування водню є обмеженою, що ускладнює його використання в суднових двигунах.

Виклад основного матеріалу. Проте водневі добавки можна використовувати в якості паливної домішки для покращення згоряння основного палива, що призводить до зменшення витрати палива та покращення експлуатаційних показників суднового двигуна, особливо на часткових та перехідних режимах.

Проведено дослідження використання водневих домішок до основного палива судна танкера ІМО: 9384447 (рис. 1) з двигуном MAN 9L48/60 [8].



а)

б)

Рис. 1. Загальний вигляд (а) судна та його машинне відділення (б)

Дане судно призначено для коротких переходів (3...5 тис. км) з транспортування нафтопродуктів. Розраховано експлуатаційний режим роботи двигуна з використанням добавки водню до основного палива в розмірі 0,1% за масою, тиском подачі водню 7 МПа.

Спираючись на уточнені розрахунки характеристик згоряння палива та враховуючи показники тепловиділення двигуна за уточненою математичною моделлю, отримано залежності витрати палива даного двигуна при використанні малих домішок водню. За рахунок подрібнення крапель розпиленого палива, при вивільненні молекулярного водню відбувається покращення сумішоутворення, а отже, збільшується повнота згоряння палива. Це призводить до зменшення питомої ефективної витрати палива на 3...5% залежно від режиму роботи та кількості додаваного водню.

Водночас, як показано на рис. 3, відбувається збільшення ефективної потужності двигуна. Для двигуна 9L48/60 (рис. 2) отримано значення ефективної потужності 10950 кВт, що більше на 1,5% від базового варіанту.

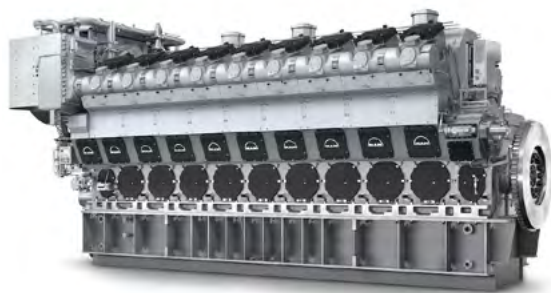


Рис. 2. Загальний вигляд двигуна 9L48/60

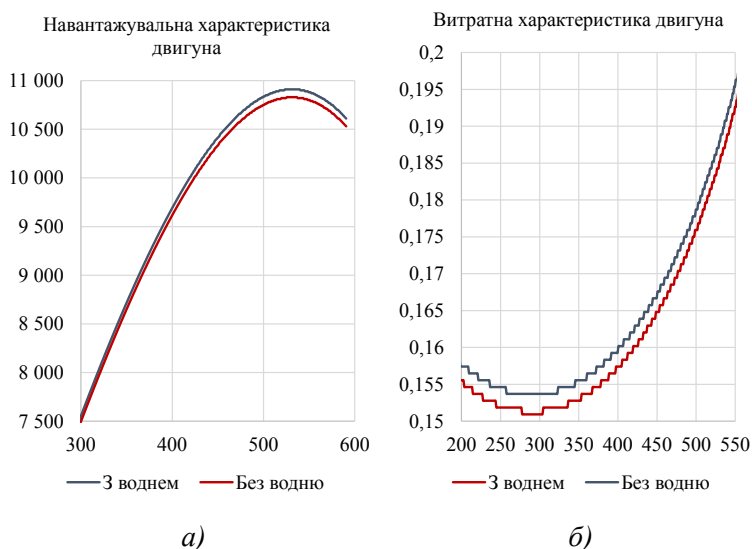


Рис. 3. Ефективні показники роботи двигуна 6L20 при зміні кількості домішки водню

Значення питомої ефективної витрати палива на номінальній частоті обертання 514 хв⁻¹ складають 0,177 кг/(кВт · год), що на 3 г менше ніж номінальна витрата палива на даному режимі. Зменшення питомої ефективної витрати палива складають 1,5...4% залежно від режиму роботи двигуна, з тенденцією до збільшення на часткових та перехідних режимах роботи двигуна (рис. 3).

Дані значення актуальні при коригуванні кута випередження впорскування в бік зменшення та сталих значеннях інших налаштувань роботи двигуна.

Висновки. Головний двигун 9L48/60B судна проекту 214 судноверфі «Factorias Vulcan» працює на дизельному паливі за стандартом ISO 8217, категорія ISO-F-DMB, і використовує 1,74 т/годину або 41,7 т палива на добу при 0,85 Не. При вартості цього палива станом на 07.03.23 900 доларів США за тону щоденна вартість палива становитиме 37 350 доларів США.

При використанні водневої добавки в обсязі 0,1% за масою, за методикою розробленою в Херсонському ННІ НУК, добова витрата водню складатиме не більше 42 кг.

Розрахунки, проведені на основі математичного моделювання з урахуванням експериментальних даних за методикою економічного розрахунку, розробленою в ХННІ НУК, показують, що у разі добавки 0,1% водню його витрата становитиме 42 кг на добу. Якщо вартість водню, отриманого газовим реформінгом, становить 2,4 доларів за кг, щоденна вартість водню становитиме ~ 100 доларів США.

Таким чином, добова економія палива, враховуючи вартість водню і зниження витрати палива на ~ 3%, складатиме 1,25 т, що коштуватиме 1000 дол. США.

У разі транспортування нафти з портів ближнього сходу до України із середньою довжиною рейсової лінії 5000 миль і середньою швидкістю 14 вузлів економія за використання водневої добавки складе ~ 16 тис. у.о. за перехід.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тимошевський Б.Г., Ткач М.Р., Шалапко Д.О. Поліпшення робочих характеристик дизельних двигунів за допомогою додавання водню. *Водний транспорт*. 2018. № 1(27). С. 24–28. URL: doi.org/10.33298/226-8553/2018.1.27.03.
2. Шалапко Д.О. Дослідження впливу параметрів налаштування паливної апаратури при використанні малих домішок водню на робочий процес та ефективні показники двигуна 6ЧН20/28. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : XII Міжнародна науково-технічна конференція : матеріали. Миколаїв : НУК, 2021. С. 276–280.
3. Тимошевський Б.Г., Ткач М.Р., Шалапко Д.О. Основні положення математичної моделі додавання водню на лінії високого тиску паливної апаратури. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2017. Т. 1., № 3(62). С. 233–237.
4. Шалапко Д.О. An experimental study of the wave effect in fuel equipment using hydrogen additives to diesel fuel. *Technology audit and production reserves*. 2018. Vol 6/1, (44). С. 36–40. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.152063.

5. Tkach M.R., Tymoshevskyy B.G., Shalapko D.O. Methods to improve the performance of diesel engines by adding hydrogen into high pressure line. *Shipbuilding & marine infrastructure*. 2018. Vol. 9., № 1. С. 82–86. DOI 10.15589/SMI. 2018.01.12.
6. Шалапко Д.О. Непрямі методи дослідження ефекту використання малих домішок водню до основного палива. *Авіакосмічна техніка та технологія*. 2018. № 6(150). С. 44–51. doi: 10.32620/akt.2018.6.07.
7. Правила технічної експлуатації морських та річкових суден. Дизелі. ККД 31.2.002.02-96: Нормативний документ морського транспорту України. Київ, 1997. 64 с.
8. 48/60B Project Guide – Marine Four-stroke diesel engines compliant with IMO Tier II. Wartsila, November 2011. 520 p. (www.mandieselturbo.com).
9. HySTAT® HYDROGEN GENERATORS. 2017. Oevel, Belgium. 16 с. (режим доступа www.hydrogenics.com).

REFERENCES

1. Timoshevsky BG, Tkach MR, Shalapko DO Improving the performance of diesel engines by adding hydrogen [Polipshennya robochykh kharakterystyk dyzel'nykh dvyhuniv za dopomohoyu dodavannya vodnyu]. *Water Transport*. 2018. № 1 (27). С. 24–28. <https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/14> [in Ukrainian].
2. Shalapko D.O. Study of the influence of fuel equipment setting parameters when using small hydrogen impurities on the work process and effective indicators of the 6ChN20/28 engine [Doslidzhennya vplyvu parametriv nalashuvannya palyvnoyi aparatury pry vykorystanni malykh domishok vodnyu na robochyy protses ta efektyvni pokaznyky dvyhuna 6CHN20/28]/ D.O. Shalapko // Innovations in shipbuilding and ocean engineering: XII International scientific and technical conference: materials. Mykolaiv : NUK, 2021. P. 276-280. [in Ukrainian].
3. Timoshevsky BG, Tkach MR, Shalapko DO The main provisions of the mathematical model of hydrogen addition on the high pressure line of fuel equipment [Osnovni polozhennya matematychnoyi modeli dodavannya vodnyu na liniyi vysokoho tysku palyvnoyi aparatury]. *Bulletin of the Kherson National Technical University*. 2017. T. 1, № 3 (62). С. 233–237 [in Ukrainian].
4. Shalapko D.O. An experimental study of the wave effect in fuel equipment using hydrogen additives to diesel fuel. *Technology audit and production reserves*. 2018. Vol 6/1, (44). Pp. 36–40. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.152063
5. Tkach M.R., Tymoshevskyy B.G., Shalapko D.O., Proskurin A.Y., Mitrophanov O.M. Methods to improve the performance of diesel engines by adding hydrogen into high pressure line. *Shipbuilding & marine infrastructure*. 2018. Vol.9., № 1. P. 82–86. DOI 10.15589/SMI. 2018.01.12
6. Shalapko D.O. Indirect methods for studying the effect of the use of small impurities of hydrogen in the main fuel [Nepryami metody doslidzhennya

- efektu vykorystannya malykh domishok vodnyu do osnovnoho palyva]. Aerospace Engineering and Technology. 2018. № 6 (150). Pp. 44–51. doi: 10.32620/aktt.2018.6.07 [in Ukrainian].
7. Rules of technical operation of sea and river vessels. Diesels. Efficiency 31.2.002.02-96: Normative document of maritime transport of Ukraine. K., 1997. 64 p.
 8. 48/60B Project Guide – Marine Four-stroke diesel engines compliant with IMO Tier II. Wartsila, November 2011. 520 p. (www.mandieselturbo.com)
 9. HySTAT® HYDROGEN GENERATORS. 2017. Oevel, Belgium. 16 p. (access mode www.hydrogenics.com)

**ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ
ПРОДУКТИВНОСТІ ВАНТАЖНО-РОЗВАНТАЖУВАЛЬНИХ РОБІТ
НА LNG-ТЕРМІНАЛАХ У МОРСЬКИХ ПОРТАХ**

Є.Л. Шкурко

старший викладач кафедри бізнес-логістики та транспортних технологій,
Інститут управління, технологій та права Державного університету інфраструктури
та технологій, Київ, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-5676-4566

Анотація

У статті представлено дослідження, яке включає аналіз технологічних рішень, переваги та обмеження їх впровадження на терміналах, а також розробку алгоритму підвищення продуктивності вантажних операцій зі зрідженим газом. Автором було проведено дослідження різноманітних технологій, що можуть бути впроваджені на LNG-терміналах для оптимізації вантажних операцій, зокрема сучасних автоматизованих систем, робототехніки, інноваційних методів розвантаження та організаційних підходів. Також було проаналізовано фактори, які впливають на успішність їх імплементації. Автором було виділено передбачені технічні та фінансові складнощі, що можуть виникнути під час впровадження нових технологій на LNG-терміналах. З метою досягнення встановленої мети автором було розроблено алгоритм впровадження технологічних рішень для підвищення продуктивності вантажних операцій з зрідженим газом на морському порту. Алгоритм включає послідовні кроки та етапи, які допоможуть забезпечити ефективну реалізацію нових технологій на терміналі. Проведене дослідження дало змогу виділити ключові показники, що впливають на продуктивність вантажних операцій на LNG-терміналах у морських портах. Автор аналізує вплив технологічних рішень на різні аспекти роботи терміналу, такі як швидкість розвантаження, безпека, витрати тощо. Для підтвердження встановленої гіпотези щодо ефективності впровадження технологічних рішень для підвищення продуктивності вантажно-розвантажувальних операцій на LNG-терміналі морського порту було проведено порівняння традиційного та інноваційного сценаріїв розвантаження контейнерів з використанням автоматизованих систем. На основі результатів дослідження було встановлено ефективність впровадження технологічних інновацій, що дозволило значно підвищити продуктивність вантажно-розвантажувальних операцій контейнерів із зрідженим газом. Узагальнюючи, дане дослідження надає важливу інформацію про технологічні рішення для підвищення продуктивності вантажних операцій на LNG-терміналах у морських портах. Впровадження автоматизованих систем та інноваційних методів розвантаження дозволяє досягти ефективного та безпечного перевантаження зрідженого газу, що є критичним у забезпеченні ефективної роботи морських портів та забезпеченні стабільного постачання LNG.

Ключові слова: технологічні рішення, підвищення продуктивності, вантажно-розвантажувальні роботи, LNG-термінали, морські порти, автоматизовані системи, зріджений газ, інноваційні методи, оптимізація процесів, контейнери зі зрідженим газом.

**TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR ENHANCING PRODUCTIVITY
OF CARGO HANDLING OPERATIONS AT LNG TERMINALS
IN MARITIME PORTS**

Ye.L. Shkurko

Senior Lecturer at the Department of Business Logistics and Transport Technologies,
Institute of Management, Technologies and Law of State University of Infrastructure
and Technologies, Kyiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-5676-4566

Summary

The article presents a study that includes an analysis of technological solutions, their advantages, and limitations in their implementation at terminals, as well as the development of an algorithm to enhance the productivity of cargo operations involving liquefied natural gas (LNG). The author conducted research on various technologies that can be implemented at LNG terminals to optimize cargo operations, including modern automated systems, robotics, innovative unloading methods, and organizational approaches. Factors influencing the success of their implementation were also analyzed. The author identified anticipated technical and financial challenges that may arise during the adoption of new technologies at LNG terminals. With the aim of achieving the set goal, the author devised an algorithm for implementing technological solutions to increase productivity in cargo operations involving liquefied gas at a maritime port. The algorithm comprises sequential steps and stages that will help ensure the efficient implementation of new technologies at the terminal. The conducted research identified key indicators affecting the productivity of cargo operations at LNG terminals in maritime ports. The author examines the impact of technological solutions on various aspects of terminal operations, such as unloading speed, safety, and costs, among others. To confirm the hypothesis regarding the effectiveness of implementing technological solutions to enhance the productivity of cargo handling operations at an LNG terminal in a maritime port, a comparison was made between traditional and innovative scenarios for unloading containers using automated systems. Based on the research results, the efficiency of implementing technological innovations was established, leading to a significant increase in the productivity of container unloading operations involving liquefied gas. In summary, this study provides crucial information about technological solutions to enhance the productivity of cargo operations at LNG terminals in maritime ports. The implementation of automated systems and innovative unloading methods enables efficient and safe handling of liquefied gas, which is critical to ensuring the effective operation of maritime ports and maintaining a stable supply of LNG.

Key words: technological solutions, productivity enhancement, cargo handling operations, LNG terminals, maritime ports, automated systems, liquefied gas, innovative methods, process optimization, containers with liquefied gas.

Постановка проблеми. Зі зростанням популярності природного газу як більш екологічного джерела енергії збільшується попит на зріджений природний газ (LNG) і, відповідно, збільшується кількість LNG-терміналів по усьому світу. При цьому вантажно-розвантажувальні роботи на таких терміналах стикаються з проблемою забезпечення високої продуктивності та ефективності операцій. Зростаючий обсяг транспортованого LNG ставить перед терміналами необхідність удосконалення робочих процесів та використання новітніх технологічних рішень для оптимізації діяльності. Відмінність фізичних властивостей рідкого газу порівняно з іншими вантажами створює додаткові виклики для забезпечення безпеки та надійності процесів розвантаження та завантаження. Таким чином, необхідні новітні наукові дослідження і розробки технологічних інновацій, які сприятимуть підвищенню ефективності та продуктивності вантажно-розвантажувальних робіт на LNG-терміналах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки спостерігається збільшений інтерес до досліджень і розробок у сфері технологічних рішень для підвищення продуктивності на LNG-терміналах. Дослідники і інженери [1–10] постійно шукають нові підходи та інноваційні технології для оптимізації процесів вантажно-розвантажувальних робіт з метою забезпечення ефективності, безпеки та зниження витрат, зокрема автоматизацію процесів, використання даних для прогнозування, застосування робототехніки та використання екологічно чистих джерел енергії тощо.

Дослідження з цієї теми охоплюють різноманітні аспекти, включаючи використання автоматизованих систем, робототехніки, вдосконалення систем управління, аналіз даних та штучний інтелект, впровадження нових матеріалів у конструкції обладнання та багато іншого.

Незважаючи на значний прогрес у цій області, ще існує низка невирішених питань, що потребують додаткового дослідження та обговорення. Однією з таких невирішених частин є вплив технологічних рішень інноваційного та організаційного характеру на продуктивність вантажних операцій на LNG-терміналах у морському порту. До цього моменту обмежений час та наявні ресурси унеможливають повний огляд та ретельний аналіз цього питання. Тому у даній науковій статті ми прагнемо проаналізувати останні дослідження та публікації з підвищення продуктивності вантажно-розвантажувальних робіт на LNG-терміналах з акцентом на важливість процесу підвищення продуктивності вантажних операцій у морських портах та можливих шляхах подальших досліджень.

Мета статті – проаналізувати технологічні рішення, спрямовані на підвищення продуктивності вантажно-розвантажувальних робіт на LNG-терміналах, визначити переваги і обмеження використання автоматизованих систем управління та робототехніки на LNG-терміналах і їх вплив на ефективність робочих процесів, виявлення можливостей використання штучного інтелекту для аналізу даних та прогнозування навантаження, що допоможе планувати роботу терміналу більш ефективно, розглянути новітні розробки матеріалів та технологій для збільшення продуктивності вантажно-розвантажувальних механізмів, що дозволить знизити час робочих циклів і збільшити завантаження.

Виклад основного матеріалу. У сучасному світі, де розвиток технологій стає визначальним фактором економічного зростання та конкурентоспроможності,

вантажно-розвантажувальні роботи на LNG-терміналах стають однією з ключових складових ефективного та безперебійного забезпечення енергетичних потреб суспільства.

Зростаюча глобальна залежність від зрідженого природного газу (LNG) як одного з найбільш чистих видів палива призводить до збільшення обсягів його транспортування та зберігання. Завдяки своїм характеристикам LNG знаходить все більше застосувань, і термінали для його розвантаження стають стратегічно важливими об'єктами [8]. Проте зростання обсягів робіт на таких терміналах ставить перед виробниками техніки та фахівцями завдання постійного вдосконалення і оптимізації процесів, що дозволить досягти максимальної продуктивності та безпеки роботи.

Підвищення продуктивності на LNG-терміналах має прямий позитивний вплив на економіку країни, забезпечуючи надійне забезпечення енергетичних потреб, розвиток галузей, пов'язаних із зрідженим газом, а також зменшення залежності від інших джерел енергії [3].

Аналіз технологічних рішень, спрямованих на підвищення продуктивності вантажно-розвантажувальних робіт на LNG-терміналах, включає в себе використання різноманітних інновацій, автоматизації процесів та впровадження передових технологій (табл. 1).

Застосування технологічних рішень на LNG-терміналах має як переваги, так і обмеження, які можуть впливати на ефективність робочих процесів.

Переваги застосування технологічних рішень на LNG-терміналах [5]:

1. Підвищення продуктивності. Автоматизація та оптимізація робочих процесів за допомогою штучного інтелекту та робототехніки дозволяють збільшити швидкість та ефективність навантаження та розвантаження LNG, що зменшує час робочих циклів.

2. Зниження ризиків. Використання автоматизованих систем і дронів допомагає знизити ризики для робітників під час вантажно-розвантажувальних операцій та моніторити стан обладнання для попередження можливих аварій.

3. Оптимізація логістики. Аналітика даних, включаючи дані від дронів та сенсорів, допомагає оптимізувати логістичні ланцюги, планувати маршрути та забезпечувати своєчасну доставку газу.

4. Підвищення точності прогнозів. Використання штучного інтелекту для аналізу великого обсягу даних дозволяє покращити прогнозування попиту на газ та навантаження, що допомагає планувати робочі процеси з урахуванням реальних потреб.

Обмеження застосування технологічних рішень на LNG-терміналах [2]:

1. Висока вартість впровадження. Впровадження технологічних рішень, таких як автоматизація та робототехніка, може знадобитися значних інвестицій, що може бути обмеженням для деяких LNG-терміналів.

2. Складність інтеграції. Інтеграція нових технологій з вже існуючими системами може бути складною і вимагати додаткових зусиль для забезпечення сумісності та ефективності.

3. Потреба у підготовці персоналу. Впровадження автоматизованих систем може вимагати підготовки персоналу для коректного використання та обслуговування нових технологій.

Таблиця 1

**Технологічні рішення щодо підвищення рівня продуктивності
вантажно-розвантажувальних робіт на LNG-терміналах**

№	Технологічні рішення	Переваги	Застосування
1	Автоматизація	Автоматизовані системи управління	Керування технічними процесами вантажних операцій
		Робототехніка	Висока швидкість та точність виконання робіт
		Автономні транспортні засоби	Зниження ризику людських помилок. Оптимізація логістики
2	Контроль і аналіз даних	Сенсорні системи	Системи моніторингу рівня, тиску, температури тощо
		Інтернет речей	Збір та обробка даних про робочі процеси
		Аналітика даних та прогнозування	Оптимізація розкладу робіт та ресурсного планування
3	Використання штучного інтелекту (ШІ)	Прогнозування попиту	Ефективне планування ресурсів
			Прогнозування навантаження і попиту
			на газ для оптимізації запасів та складських просторів
			Зниження ризику надлишку/недостачі
			Розробка стратегій розвитку та логістичних рішень на основі аналізу прогнозованих даних
			Автоматизоване розвантаження і завантаження LNG-суден та контроль за процесами
	Автоматизація процесів розвантаження	Швидкість та ефективність операцій	Використання автономних роботів для безпечного та швидкого розвантаження
		Зниження ризику для робітників	
	Аналітика даних та планування	Обґрунтоване прийняття рішень	Аналіз даних з дронів для оптимізації логістичних ланцюгів та транспортування газу
		Виявлення тенденцій споживання	Моніторинг роботи обладнання та аналітика даних для зниження ризиків аварій
4	Інновації в навантажувальних системах	Супершвидке навантаження (Top Loading)	Зменшення часу розвантаження
		Навантаження замкненим циклом	Ефективне розвантаження LNG з танкерів
		Автоматизовані системи	Зниження викидів та втрати палива
		Забезпечення безпеки робочих процесів	Мінімізація випаровування під час розвантаження
			Оптимізація процесів навантаження та розвантаження

Джерело: розроблено автором на основі [1; 7; 10]

4. Вразливість до кібератак. Використання штучного інтелекту та інших автоматизованих систем може зробити термінали більш вразливими до кібератак та несанкціонованого доступу, що потребує додаткових заходів забезпечення кібербезпеки.

При впровадженні технологічних рішень на LNG-терміналах слід урахувати ці переваги та обмеження, а також забезпечувати належну підготовку та інтеграцію систем, щоб досягти оптимальної ефективності робочих процесів та підвищити безпеку операцій.

У сучасному глобальному енергетичному ландшафті LNG-термінали у морських портах займають ключову роль у забезпеченні безпечного, ефективного та швидкого обслуговування різноманітних LNG-суден і навантаження/розвантаження зрідженого природного газу (LNG). З підвищенням світового попиту на газ тиск на термінали збільшується, що вимагає розробки інноваційних технологічних рішень для підвищення продуктивності та забезпечення ефективності вантажно-розвантажувальних робіт.

Продуктивність вантажних операцій на LNG-терміналах у морських портах може підвищуватись за рахунок впровадження різноманітних технологічних та організаційних рішень. Ось декілька з них [9]:

1. Автоматизовані системи розвантаження та підйому. Впровадження автоматизованих систем розвантаження (наприклад, кранові системи або рухомі конвеєри) дозволяє знизити час вантажних операцій, уникнути затримок і забезпечити більш ефективний рух вантажу.

2. Електричні приводи. Застосування електричних приводів на кранах та іншому обладнанні допомагає знизити шум, забруднення та викиди, а також покращити точність та реакцію обладнання.

3. Робототехніка. Використання роботів для вантажних операцій може допомогти підвищити продуктивність, особливо в умовах, коли потрібна повторювана та точна робота, наприклад, упакування або маніпулювання контейнерами.

4. Аналітика даних та ШІ. Збір та аналіз даних про продуктивність, час виконання операцій, навантаження та інші параметри дозволяє ідентифікувати потенційні затримки, оптимізувати розклади робіт, планувати затримки та знизити час робочих циклів.

5. Застосування новітніх матеріалів. Використання новітніх матеріалів, таких як композити або алюмінієві сплави, може знизити вагу обладнання, що сприяє підвищенню продуктивності руху вантажів та зниженню витрат палива.

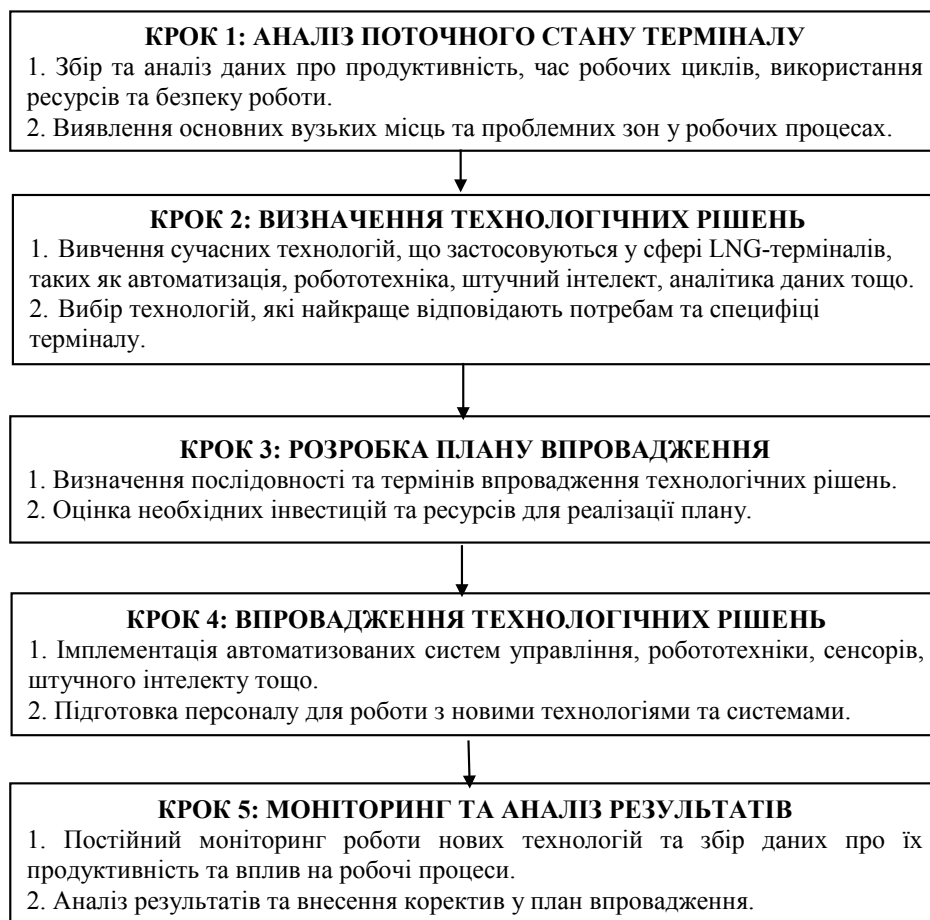
6. Підвищення кваліфікації персоналу. Навчання та підвищення кваліфікації персоналу допомагають забезпечити більш ефективне та безпечне виконання вантажних операцій, а також більш ефективне використання обладнання.

7. Оптимізація логістичних процесів. Оптимізація логістичних процесів та координація між різними етапами вантажних операцій дозволяють уникати зайвих затримок та оптимізувати роботу терміналу.

Ці рішення можуть спільно або окремо сприяти підвищенню продуктивності вантажних операцій на LNG-терміналах у морських портах, забезпечуючи більш ефективний та безпечний рух вантажів та зниження часу робочих циклів.

Процес впровадження технологічних рішень для підвищення продуктивності вантажних операцій на LNG-терміналі у морському порту може бути

візуалізований через алгоритм, який наведено на рис. 1. Цей алгоритм дозволяє систематично і поетапно впроваджувати нові технології на терміналі, забезпечуючи ефективне та безперебійне функціонування LNG-терміналу та збільшуючи його продуктивність. Кожен крок алгоритму покладається на науковий аналіз та практичний досвід для досягнення максимальних переваг та оптимального результату на користь енергетичного ринку та загальної економіки.



*Рис. 1. Алгоритм впровадження технологічних рішень для підвищення продуктивності вантажних операцій на LNG-терміналі у морському порту
Джерело: розроблено автором на основі [6; 10]*

Впровадження технологічних рішень у робочі процеси LNG-терміналу в морському порту сприятиме підвищенню продуктивності у таких аспектах [4]:

1. Зниження часу робочих циклів завдяки автоматизації та робототехніці, що допоможе збільшити кількість навантажувальних/розвантажувальних операцій за один період.

2. Оптимізація використання ресурсів, наприклад, ефективне використання палива та електроенергії, що знижує витрати та покращує енергоефективність.

3. Вдосконалення безпеки роботи завдяки використанню сенсорів, штучного інтелекту та аналізу даних для виявлення потенційних небезпек та аварійних ситуацій.

4. Оптимізація логістичних процесів та планування робочих операцій з використанням аналітики даних, що сприятиме точнішому прогнозуванню попиту та підвищить ефективність роботи терміналу.

У таблиці 2 приведені ключові показники, які впливають на продуктивність вантажних операцій на LNG-терміналах у морських портах. Кожен показник супроводжується описом, який висвітлює його значення та взаємозв'язок з продуктивністю робочих процесів.

Таблиця 2

**Показники підвищення продуктивності вантажних операцій
на LNG-терміналах у морських портах**

Показник підвищення продуктивності	Опис показника	Вплив на продуктивність
Зниження часу розвантаження	Скорочення часу вивантаження з судна	Збільшення обсягу вивантаження за одиницю часу
Підвищення швидкості роботи	Збільшення швидкості переміщення контейнерів або розвантажувального обладнання	Зниження часу на завершення вантажних операцій
Збільшення кількості операцій за одиницю часу	Збільшення обсягу операцій, що виконуються одночасно	Підвищення загального вантажного обігу
Оптимізація транспортування	Оптимальне планування маршрутів і навантаження транспортних засобів	Зменшення витрат на транспортування та час доставки
Ефективне використання ресурсів	Оптимізація використання робочої сили, обладнання та матеріалів	Зниження витрат і максимальне використання ресурсів

Джерело: розроблено автором на основі [5]

На основі проведених досліджень, розглянемо приклад щодо впровадження автоматизованих систем розвантаження та оптимізації транспортування і яким чином цей процес впливає на підвищення продуктивності вантажних операцій на терміналі. Припустимо, що у нас є термінал, який здійснює розвантаження суден і перевалку контейнерів з LNG. Порівняємо продуктивність двох сценаріїв: традиційний та інноваційний з впровадженням автоматизованих систем розвантаження та оптимізацією транспортування (табл. 3).

Результати порівняльного аналізу продуктивності традиційного та інноваційного сценаріїв розвантаження контейнерів на LNG-терміналах в морських портах свідчать про значний прогрес у використанні автоматизованих систем та технологій. Впровадження інноваційного сценарію, який включає автоматизовані системи управління та збільшення автоматизації, призвело до зниження часу розвантаження одного судна на 50%, підвищення кількості розвантажених контейнерів на одне судно на 50%, а також скорочення часу транспортування одного контейнера

Таблиця 3

**Порівняння продуктивності традиційного і інноваційного сценаріїв
розвантаження контейнерів**

Показник	Традиційний сценарій (без інновацій)	Інноваційний сценарій (з автоматизованими системами)
Час розвантаження одного судна, год.	48	24
Кількість розвантажених контейнерів, од.	200	300
Час транспортування одного контейнера до складу, год.	1	0,5
Кількість робітників для виконання розвантаження	20	10

Джерело: розроблено автором

до складу вдвічі. Зменшення кількості працівників для виконання розвантаження також є значущим, оскільки кількість працівників знижується на половину. Ці результати підтверджують перспективність технологічних рішень та автоматизації для оптимізації та підвищення ефективності вантажних операцій на LNG-терміналах у морських портах, що може вплинути на стійкий розвиток енергетичного сектору та підвищити конкурентоспроможність в міжнародному контексті.

Отже, впровадження технологічних рішень на LNG-терміналах у морських портах виявилось ефективним заходом для підвищення продуктивності та оптимізації робочих процесів. Автоматизація та використання інноваційних технологій сприяють зменшенню часу розвантаження, підвищенню обсягів перевантаження, зниженню витрат та підвищенню загальної ефективності діяльності терміналів.

Висновки. Дослідження з технологічних рішень для підвищення продуктивності вантажно-розвантажувальних робіт на LNG-терміналах у морських портах засвідчили значний науковий і практичний інтерес у цій області. Впровадження автоматизованих систем, робототехніки та штучного інтелекту на терміналах робить робочі процеси більш ефективними, прогресивними та сучасними.

Застосування автоматизованих систем управління дозволяє впровадити координацію та синхронізацію діяльності різних робочих елементів терміналу, що знижує час розвантаження та підвищує його продуктивність. Зменшення залежності від ручного керування та оптимізація ресурсів забезпечують кращий контроль над робочими процесами та сприяють зниженню витрат. Робототехніка впроваджує автоматизовані робочі механізми, що допомагають уникнути рутинної та тяжкої праці, забезпечуючи одночасно підвищення безпеки та точності операцій.

Застосування штучного інтелекту дозволяє аналізувати та прогнозувати дані з великих обсягів інформації, що допомагає управляти терміналом з більшою ефективністю. Використання штучного інтелекту для прогнозування навантаження та планування робочих операцій дозволяє забезпечити більш гнучке та оптимальне використання ресурсів.

Однак впровадження технологічних рішень на LNG-терміналах також зустрічає певні виклики. Прийняття нових технологій вимагає значних інвестицій, перепідготовки персоналу та інтеграції нових систем з існуючими. До того ж, наявність

автоматизованих систем може залежати від технічних обмежень та складності впровадження на старих терміналах.

Загалом, впровадження технологічних рішень на LNG-терміналах у морських портах є перспективним напрямком для підвищення продуктивності та оптимізації робочих процесів. Вирішення проблем впровадження та подальший розвиток цих технологій стане важливим завданням для забезпечення стійкого розвитку енергетичного сектору та підвищення конкурентоспроможності морських портів на світовому ринку. Досягнення цих цілей потребує подальших досліджень та співпраці між науковцями, інженерами та промисловими гравцями для забезпечення ефективного та стійкого розвитку LNG-терміналів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Chiu, C.H., Huang, H.C. Sustainable design and operation of LNG terminals for future energy demands. *Energy Policy*, 118, 2018, 404–412.
2. Chong, W.K., Tan, W.S. Novel approaches to enhance the efficiency of LNG regasification process. *Energy Conversion and Management*, 115, 2016, 291–299.
3. Genc, T.S., Aydin, H. Innovative safety measures for LNG terminals: A case study. *Journal of Energy Engineering*, 142(3), 2016.
4. Gomes, J.F., Nascimento, A.S. Innovative financing models for LNG terminal projects: A comparative analysis. *Energy Policy*, 129, 2019, 290–298.
5. Kim, C.N., Lee, S.H. Integration of renewable energy sources with LNG terminals: A feasibility study. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 50, 2018, 321–328.
6. La Viña, T., Lopez, M. Environmental impact assessment of LNG terminal projects. *Energy Policy*, 126, 2019, 431–440.
7. Miyamoto, A., Yamamoto, K. Technological advancements in LNG terminals for small-scale applications. *Energy Conversion and Management*, 153, 2017, 92–101.
8. Ng, K.C., Liu, F. Emerging technology trends in LNG terminals. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 37, 2017, 96–104.
9. Ross, P.E., Smith, J.W. Innovations in floating LNG terminals: Challenges and opportunities. *Energy Conversion and Management*, 198, 2019.
10. Sullivan, P., Thompson, G. LNG terminal developments: A global perspective. *LNG Journal*, 25(2), 2020, 34–39.

**РОЗВИТОК ФАХОВИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ
КУРСАНТІВ-СУДНОМЕХАНІКІВ: ФІЗИЧНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ,
CHATGPT ТА АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ПІРОМЕТРІВ
У СУДНОВИХ СИСТЕМАХ**

С.О. Яремчук¹, І.З. Маслов²

¹к.т.н., доцент кафедри управління в транспортній галузі,
Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»,
Ізмаїл, Одеська область, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-6736-1471

²к.т.н., доцент, завідувач кафедри судових енергетичних установок і систем,
Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»,
Ізмаїл, Одеська область, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-1759-6077

Анотація

Вступ. В роботі обґрунтована необхідність поглиблення знань курсантів-судномеханіків щодо явищ та законів теплового випромінювання шляхом проведення фізичного експерименту та застосування системи штучного інтелекту. Описана проблема недостатнього зв'язку між теоретичними знаннями курсантів фізичних законів та їх практичним застосуванням в обладнанні суднових систем. **Метою роботи** є розвиток фахових компетентностей курсантів-судномеханіків шляхом дослідження явища теплового випромінювання, та використання ChatGPT для пошуку інформації щодо застосування пірометрів у суднових системах. **Результати.** Розроблена та апробована покрокова методика, яка описує лабораторне дослідження явища теплового випромінювання; виконання розрахунків фізичних величин; пошук за допомогою ChatGPT інформації щодо видів, переваг, недоліків та областей застосування пірометрів у суднових системах; аналіз інформації та розробку багатоаспектної класифікації пірометрів суднових систем. **Висновки.** В роботі застосований крос-дисциплінарний підхід, який поєднує теоретичні знання та практичні навички в області фізики, інформаційних технологій та системного аналізу. Запропоновані методикою активності дали змогу підвищити рівень розвитку фахових компетентностей курсантів-судномеханіків і забезпечили підвищення абсолютної успішності на 16%, якості на 11% за результатами іспиту. Визначені переваги застосування ChatGPT, відмічена неможливість використання штучного інтелекту в складних системах управління без участі людини через неможливість передбачення та навчання системи для усіх можливих комбінацій ситуацій та подій.

Ключові слова: теплове випромінювання, фізичний експеримент, штучний інтелект, пірометри суднових систем.

**DEVELOPMENT OF PROFESSIONAL COMPETENCIES AMONG
CADET-SHIP MECHANICS: PHYSICAL EXPERIMENT, CHATGPT,
AND ANALYSIS OF THE USE OF PYROMETERS IN SHIP SYSTEMS**

S.O. Yaremchuk¹, I.Z. Maslov²

¹PhD, Associate Professor at the Department of Transport Management,
*Danube Institute of National University "Odesa Maritime Academy",
Izmail, Odesa region, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-6736-1471*

²Ph.D., Associate Professor, Head of the Department of Ship Power Plants and Systems,
*Danube Institute of National University "Odesa Maritime Academy",
Izmail, Odesa region, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-1759-6077*

Summary

Introduction. *The work substantiates the need to deepen the knowledge of cadet-ship mechanics in the field of the phenomena and laws of thermal radiation by conducting a physical experiment and using an artificial intelligence system. The problem of insufficient connection between the theoretical knowledge of cadets and the practical application of that knowledge in ship system equipment is described. **The purpose** of this work is to develop the professional competencies of cadet-ship mechanics through the study of the thermal radiation phenomenon and the use of ChatGPT to search for information about the use of pyrometers in ship systems. **Results.** The technique has been developed and tested. The technique describes a laboratory study of the thermal radiation phenomenon. Using ChatGPT, we searched for information about the types, advantages, disadvantages, and applications of ship pyrometers. We then analyzed this information and developed a multi-aspect classification scheme for ship pyrometers. **Conclusions.** The work utilizes a cross-disciplinary approach that combines theoretical knowledge and practical skills in the fields of physics, information technology, and systems analysis. The activity-based methodology proposed in this work has enabled the development of professional competencies among cadet-ship mechanics and led to a 16% increase in overall success rates and an 11% improvement in exam scores. The advantages of the ChatGPT AI system have been identified, but the inability of AI to operate in complex management systems without human involvement due to the impossibility of predicting and teaching the system for all possible situations and events has been noted.*

Key words: *thermal radiation, physical experiment, artificial intelligence, ship system pyrometers.*

Вступ. Важливою складовою освітньої підготовки за спеціальністю 271 «Морський та внутрішній водний транспорт» спеціалізації 271.02 «Управління судновими технічними системами і комплексами» є набуття курсантами фахових компетентностей з фізики, які дають можливість майбутнім судновим механікам критично осмислювати основні поняття, принципи та методи сучасної морської інженерії; обирати та застосовувати інноваційні підходи та інструментальні засоби для розв'язання складних професійних задач; обґрунтовувати власну точку зору та висновки, використовуючи новітні теорії та концепції у сфері морської

інженерії. Фахові компетентності з фізики ґрунтуються на теоретичному вивченні та експериментальному дослідженні фізичних явищ та законів, які лежать в основі роботи суднових приладів, установок та систем.

Серед багаточисельних суднових вимірювальних приладів важливе місце посідають пірометри, які дозволяють вимірювати не лише температуру, а також вологість на певній відстані від об'єкту, розраховувати точку роси, попереджати про небезпеку утворення конденсату тощо. В основі роботи пірометрів лежать закони теплового випромінювання, тому їх вивчення, та аналіз застосування сучасних пірометрів в суднових системах є важливою та невід'ємною складовою фахової підготовки курсантів-судномеханіків.

Постановка проблеми. Знання явищ, моделей та законів теплового випромінювання є дуже важливою складовою фахової підготовки курсантів. Однак проблема полягає в тому, що лише теоретична підготовка не надає курсантам повної та цілісної картини цього явища. Для глибшого розуміння процесів теплового випромінювання необхідне експериментальне дослідження та кількісно оцінка фізичних величин, що характеризують теплове випромінювання. Наочний фізичний експеримент, власноруч проведений курсантами в лабораторних умовах, дає можливість задіяти їх асоціативну пам'ять, яка реалізує зв'язок між реальними діями та обставинами, і глибинними знаннями. Спогад проведеного експерименту здатен викликати в пам'яті курсантів пов'язані знання, дозволяючи думкам по ланцюжку мислених асоціацій рухатися від одних знань до інших. Саме асоціативні зв'язки витягують з глибин накопичених в пам'яті знань, досвіду, обставин, та уявлень саме ту інформацію, яка необхідна для вирішення професійних завдань.

Ще одна проблема полягає у слабкій прив'язці знань курсантів щодо теоретичних законів фізики до їх застосувань в приладах у складі суднового обладнання. Окрему категорію таких приладів складають пірометри – прилади безконтактного вимірювання температури нагрітих тіл за інтенсивністю їх теплового випромінювання. Для подолання розриву між знаннями теоретичних законів, та їх практичним застосуванням в суднових приладах, курсантам необхідна актуальна інформація щодо можливостей та областей застосування сучасних пірометрів у складі суднових систем, їх характеристик, особливостей роботи, переваг та недоліків.

Вирішення описаних проблем зумовлює необхідність огляду законів теплового випромінювання, проведення фізичного експерименту, необхідних розрахунків для кількісної оцінки фізичних величин, пошуку та аналізу актуальної інформації щодо практичного застосування пірометрів на судні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Всі тіла випромінюють електромагнітні хвилі. Тепловим випромінюванням називається електромагнітне випромінювання, зумовлене збудженням атомів і молекул тіла за рахунок енергії їх теплового руху [1, с. 307–313]. Інтенсивність теплового випромінювання і його спектральний склад залежать від температури і хімічної природи тіла. Серед кількісних характеристик теплового випромінювання відомі такі:

– Випромінювальна здатність тіла (ВЗ) – це кількість енергії, що випромінюється за одиницю часу з одиниці площі тіла в одиничному інтервалі частот:

$$r(v, T) = \frac{dW_{\text{вип}}}{dt \cdot dS \cdot dv} \left[\frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Гц}} \right] \quad (1)$$

– Інтегральна випромінювальна здатність (ІВЗ) – це кількість енергії, що випромінюється за одиницю часу з одиниці площі тіла у всьому інтервалі частот від нуля до нескінченності:

$$R_{\nu}(T) = \frac{dW}{dt \cdot dS} \left[\frac{Дж}{м^2 \cdot с} = \frac{Вт}{м^2} \right]. \quad (2)$$

Між ІВЗ $R_{\nu}(T)$ та ВЗ $r(\nu, T)$ існує зв'язок:

$$R_{\nu}(T) = \int_0^{\infty} r(\nu, T) \cdot d\nu. \quad (3)$$

Поглинальна здатність тіла (ПЗ) – це відношення поглиненої тілом енергії до всієї падаючої на тіло енергії в інтервалі частот від ν до $\nu + d\nu$:

$$a(\nu, T) = \frac{dW_{\nu}^{погл}}{dW_{\nu}^{пад}}. \quad (4)$$

При дослідженні законів теплового випромінювання застосовуються наступні фізичні абстракції. Абсолютно чорне тіло (АЧТ) – це фізична абстракція, під якою слід розуміти тіло, ПЗ якого для всіх частот і температур дорівнює одиниці: $a(\nu, T) = 1$. Моделлю АЧТ може бути порожня непрозора сфера з невеликим отвором (рис. 1). Промінь, проходячи крізь отвір А у порожнину С, багаторазово відбивається та практично цілком поглинається.

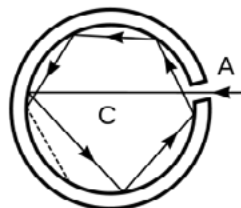


Рис. 1. Модель АЧТ

Абсолютно сіре тіло (АСТ) – це фізична абстракція, під якою слід розуміти тіло, ПЗ якого менше одиниці, однак постійна для всіх частот і температур. У кольорового тіла (КТ) ПЗ є функцією частоти і температури (рис. 2).

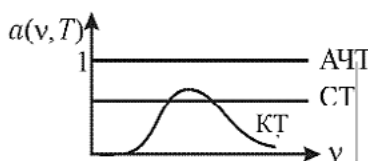


Рис. 2. Графічне зображення АЧТ, АСТ та КТ

Приведемо основні закономірності теплового випромінювання:

– Закон Кірхгофа встановлює зв'язок між ВЗ і ПЗ тіла: відношення ВЗ тіла до його ПЗ не залежить від природи тіла і дорівнює ВЗ АЧТ (при тій же частоті і температурі):

$$\frac{r_1(\nu, T)}{a_1(\nu, T)} = \frac{r_2(\nu, T)}{a_2(\nu, T)} = r^*(\nu, T), \quad (5)$$

де $r^*(\nu, T)$ – ВЗ АЧТ. Це відношення є універсальною (для всіх тіл) функцією частоти і температури. Основна проблема випромінювання АЧТ – визначення виду функції $r^*(\nu, T)$. Експерименти дозволили знайти цю залежність і сформулювати деякі частинні закони випромінювання АЧТ. Експериментальні залежності $r^*(\nu, T)$ для двох значень температури показані на рис. 3.

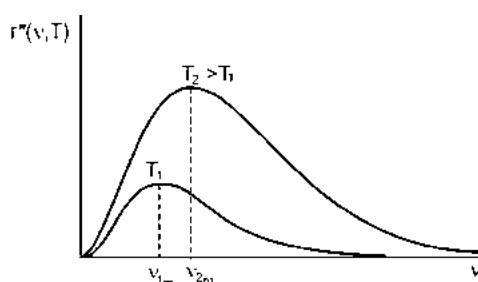


Рис. 3. Експериментальні залежності ВЗ для АЧТ для різних значень частот і температур

Аналіз графіку свідчить, що ВЗ для АЧТ падає при малих і великих частотах і досягає максимуму при деякому значенні ν_m . З ростом температури ВЗ зростає, а її максимальне значення зміщується в область великих частот.

– Закон Стефана-Больцмана: ІВЗ для АЧТ пропорційна четвертій степені його абсолютної температури, тобто

$$R_s^* = \sigma T^4, \quad (6)$$

де σ – стала Стефана-Больцмана.

– Закон Віна: частота, на яку приходиться максимум ВЗ для АЧТ, пропорційна його абсолютній температурі:

$$\nu_m = b T, \quad (7)$$

де b – стала Віна.

– Другий закон Віна: максимальна ВЗ для АЧТ пропорційна третій степені його абсолютної температури:

$$r^*(\nu_m) = CT^3 \cdot r^*(\nu, T). \quad (8)$$

Однак описані закони не дають можливості відтворити вигляд залежності $r^*(\nu, T)$. Для його знаходження Д. Релей і Д. Джинс використали класичний закон розподілу енергії за ступенями свободи, і запропонували формулу ВЗ для АЧТ:

$$r^*(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^3} kT, \quad (9)$$

де c – швидкість світла, k – стала Больцмана. Ця формула передбачає квадратичне зростання ВЗ зі збільшенням частоти ν , і співпадає з експериментальними даними в області малих частот. При збільшенні частоти ВЗ мала би нескінченно зростати. Однак теорія різко розходиться з експериментом. Цей парадокс класичної фізики – невідповідність теорії експерименту – отримав назву «ультрафіолетової катастрофи».

Цю проблему розв’язав Макс Планк, коли висловив гіпотезу, що процес випромінювання і поглинання світла відбувається не безперервно, а дискретними порціями (квантами), енергія яких визначається формулою:

$$\varepsilon = h \cdot \nu, \quad (10)$$

де h – універсальна константа, яку називають сталою Планка [2, с. 185–189]. За допомогою нових уявлень про природу випромінювання Планк відкрив функцію розподілу енергії випромінювання АЧТ за частотами:

$$r^*(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad (11)$$

яка дуже точно відтворює експериментальну криву $r^*(\nu, T)$, і дозволяє підтвердити експериментальні дані випромінювання АЧТ.

На описаних закономірностях теплового випромінювання ґрунтується пірометрія – область технічних застосувань для безконтактного вимірювання температури тіл. Сукупність оптичних методів визначення температур, які ґрунтуються на законах рівноважного випромінювання, називається оптичною термометрією, а методи вимірювання високих температур називаються оптичною пірометрією [3, с. 269–271]. Залежно від того, який із законів випромінювання покладено в основу методу вимірювання, розрізняють три умовні температури: *радіаційну, яскравісну та колірну*, та відповідно, три види пірометрів.

Під *радіаційною* розуміють температуру АЧТ, при якій його ВЗ однакова з ВЗ тіла, температуру якого визначають. Радіаційну температуру вимірюють радіаційним пірометром, об'єктив якого дає змогу одержати чітке зображення джерела світла на приймачі. Пірометри попередньо градуують за допомогою АЧТ, температура якого відома.

Під *яскравісною* розуміють температуру АЧТ, при якій його ВЗ дорівнює ВЗ досліджуваного тіла для тієї самої довжини хвилі. Яскравісну температуру вимірюють пірометром із зникаючою ниткою. Принцип його дії полягає в тому, що зображення поверхні нагрітого тіла, температуру якого визначають, суміщають із площиною нитки лампи розжарення, яка вмикається в електричне коло. Поверхня тіла і нитка спостерігаються через окуляр. Якщо температура нитки нижче температури досліджуваного тіла, то нитка має вигляд темної смужки на тлі зображення тіла, а якщо температура нитки вище температури тіла, то нитка буде більш світлою, ніж поверхня тіла. Змінюючи силу струму, можна змінювати яскравість нитки. Коли яскравості нитки і досліджуваного тіла зрівняються, нитка «зникає», а їхні температури будуть однакові. Міліамперметр попередньо градуують у градусах за допомогою випромінювання АЧТ. Коли величина ПЗ випромінювального тіла відома, то за яскравісною температурою можна визначити справжню температуру тіла.

Під *колірною* розуміють температуру АЧТ, при якій спектральний склад його випромінювання однаковий із спектральним складом досліджуваного тіла. Поняття колірної температури застосовується до сірих тіл. Для тіл, у яких проявляється селективність випромінювання, поняття колірної температури не має змісту. Ряд реальних випромінювачів (оксиди металів, кераміка, графіт та ін.) практично являють собою сірі тіла. Для не сірих тіл колірна температура вища за справжню температуру. Колірна температура більшості твердих тіл і рідин значно менше відрізняється від справжньої температури, ніж радіаційна чи яскравісна.

За допомогою оптичних пірометрів вимірюють не справжні, а умовні температури: радіаційну, яскравісну і колірну, за якими можна розрахувати справжню температуру тіла, якщо відомі його оптичні характеристики.

Для зменшення витрат часу на дослідження розрахунки фізичних величин необхідно автоматизувати. На наш погляд, розрахунки фізичних величин, та в подальшому навчальні та інженерні розрахунки морським інженерам доцільно програмувати в Google Sheets. Головна перевага цього безкоштовного табличного онлайн-редактора з потужними обчислювальними можливостями полягає в тому, що таблиці зберігаються в хмарі, синхронізуються автоматично, і до них можна отримати доступ з будь-якого місця з будь-якого пристрою і в будь-який час [4].

Для подолання розриву між знаннями теоретичних законів теплового випромінювання, та їх практичним застосуванням, потрібно вияснити, які саме пірометри застосовуються на суднах, та в яких саме судових системах. Пошук відповіді на ці запитання пропонується курсантам здійснити за допомогою ChatGPT. ChatGPT – це система штучного інтелекту (ШІ) для генерації текстів, яка базується на алгоритмах глибокого навчання. Розробники мовної моделі, компанія OpenAI [5], постійно докладають зусиль для розвитку та оновлення ChatGPT. На наш погляд, використання ChatGPT – це наразі найкращий спосіб пошуку нової, ще не опублікованої у підручниках та навчальних посібниках, інформації.

Для ефективного використання ChatGPT розроблені конкретні рекомендації [6]:

1) щоб отримати бажаний результат, потрібно надати ChatGPT максимально конкретні текстові вказівки;

2) ChatGPT навчався на даних з багатьох мов, але кількість англійського тексту в навчальному матеріалі значно більша, тому для покращення результату слід виконувати запити англійською;

3) ChatGPT обробляє до 4096 токенів у вхідних даних, будь-який символ, що перевищує цю кількість, ігнорується без повідомлення. Токен приблизно еквівалентний слову, в залежності від випадку використання;

4) Генерацію відповідей можна зупинити за допомогою кнопки «Стоп» над полем введення, якщо зрозуміло, що ChatGPT рухається в неправильному напрямку;

5) якщо під час чату було введено надто багато даних, може бути корисно почати новий чат, щоб наступні відповіді не були зіпсовані;

6) ввічливі фрази на кшталт «будь ласка» і «дякую» є зайвими.

За допомогою ChatGPT виконано пошук інформації щодо світових наукових досліджень в області теплового випромінювання протягом останніх п'яти років. Це дослідження ефективності концепції гарячої стіни на основі використання наночастинок для зменшення випромінювання тепла в паливних камерах газотурбінних двигунів; моделювання теплового випромінювання та створення математичної моделі прогнозування теплового випромінювання від об'єктів з високою температурою; аналіз впливу факторів на теплове випромінювання від газових плям; дослідження суттєвого впливу форми поверхні тіла (сферична, циліндрична, конічна та прямокутна) на випромінювання тепла з поверхонь з різними покриттями; дослідження взаємодії світла з метаматеріалами для зменшення теплового випромінювання [5]. Метаматеріали – це штучні матеріали з незвичайними властивостями. Вони складаються з мікроструктур, які розміщені на відстані порівнянній з довжиною електромагнітної хвилі. Такі

структури можуть здійснювати контрольовану маніпуляцію світлом, здатні блокувати, змінювати напрямок, розсіювати або поглинати електромагнітні хвилі різних довжин, включаючи світло, інфрачервоне випромінювання та радіохвилі. Метаматеріали мають потенціал для розвитку різноманітних технологій, таких як надшвидкі обчислення, покращення ефективності електроніки, медичних приладів, сенсорів, антен, сонячних батарей та інших пристроїв. Проте, слід зазначити, що застосування метаматеріалів наразі не є широко поширеним через технічні труднощі в їх виготовленні, складність управління їх властивостями, та високі витрати на дослідження та виробництво [5].

ChatGPT не тільки генерує унікальні тексти за запитом. Ця система ШІ здатна стати дієвим, швидким та продуктивним асистентом студента та викладача, система здатна генерувати плани, ідеї, питання, тести, презентації тощо. При цьому існує застереження – використання ChatGPT як єдиного джерела інформації в академічних умовах не рекомендується, оскільки система не здатна відокремити правду від вигадки [7], тому отриману інформацію слід перевіряти на основі більш достовірних джерел.

Для розвитку компетентностей з фізики, та наближення теоретичних знань здобувачів до практичного їх застосування у вирішенні фахових задач, ми рекомендували курсантам використовувати ChatGPT для пошуку нової інформації щодо судових пірометрів після отримання знань з ґрунтового навчального посібника [3]. Таким чином, експериментальне дослідження явища теплового випромінювання, пошук за допомогою ChatGPT актуальної інформації щодо використання пірометрів в судових системах, та її аналіз є актуальною крос-дисциплінарною задачею, та обумовлює мету роботи.

Мета та завдання роботи. *Метою роботи є підвищення рівня розвитку фахових компетентностей курсантів-судномеханіків шляхом розробки та апробації методики дослідження, яка поєднує фізичний експеримент явища теплового випромінювання, використання ChatGPT для пошуку інформації, та аналіз інформації щодо застосування пірометрів в судових системах.*

Для досягнення мети роботи необхідно розробити та виконати *покрокову методику дослідження*, яка детально описує виконання таких завдань:

- 1) провести фізичний експеримент з дослідження явища теплового випромінювання, розрахувати значення поглинальної здатності та інтегральної якравості для АСТ в табличному онлайн-редакторі Google Sheets;
- 2) за допомогою ChatGPT отримати актуальну інформацію щодо характеристик, особливостей, переваг, недоліків та областей застосування пірометрів у судових системах;
- 3) проаналізувати інформацію та побудувати класифікацію пірометрів.

Виклад основного матеріалу дослідження. *Розробка та виконання покрокової методики дослідження.*

Крок 1. Фізичний експеримент з дослідження явища теплового випромінювання. Для експерименту необхідно використати лабораторну установку, електрична схема якої показана на рис. 4.

В установці в якості АСТ використовується вольфрамова нитка лампи розжарювання з площею $S = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ (м}^2\text{)}$. Випромінювання нитки в інтервалі температур

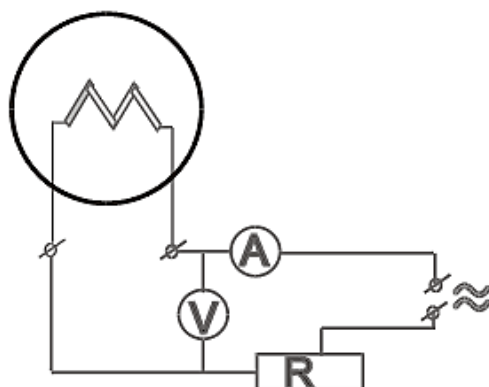


Рис. 4. Схема лабораторної установки

800–2000°C несуттєво відрізняється від випромінювання АСТ. При заданих значеннях сили струму I визначають значення напруги U , і вимірюють температуру розжарення лампи пірометра зі «зникаючою ниткою». Значення температури визначається за градурувальною кривою, графік якої нанесений на міліметровий папір, та входить до складу установки. На рис. 5 зображені курсанти Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія» в лабораторії фізики в процесі виконання експерименту.

Виміри значень U і T при кожному значенні сили струму курсанти виконують три рази. Результати вимірів заносять в 2, 3, 4 колонки таблиці 1. Колонки 5, 6 і 7 розраховані за допомогою табличного онлайн-редактора Google Sheets.



Рис. 5. Курсанти в процесі виконання експерименту

В 5 колонці розрахована електрична потужність лампи. В 6 і 7 колонках розраховані відхилення для обчислення похибок.

Таблиця 1

Отримані експериментальні дані

№	$I (\mu A)$	$U (B)$	$T (K)$	$P = IU (Bm)$	$\Delta T (K)$	$\Delta T^2 (K)^2$
1	23	1,4	1160	32,2	76,6667	5877,7778
2	40	1,6	1230	64	6,6667	44,4444
3	60	1,8	1320	108	-83,3333	6944,4444
Середні значення	41	1,6	1236,6667	68,0667		4288,8889

Крок 2. Виведення розрахункових формул. Оскільки ПЗ для АСТ постійна і не залежить від частоти, закон Кірхгофа можна записати так:

$$r(v, T) = ar^*(v, T) \quad (12)$$

Інтегруючи цей вираз по частоті в межах від нуля до нескінченності, отримаємо наступний вираз:

$$\alpha = \frac{R_3}{R_3^*}, \quad (13)$$

де R_3 і R_3^* – інтегральні ВЗ для АСТ та АЧТ. При сталому процесі випромінювання потужність електричного струму, що підводиться до лампи, цілком перетворюється в енергію випромінювання, і визначається формулою:

$$R_3 = \frac{P}{S}, \quad (14)$$

де $P = IU$ – електрична потужність лампи, а S – площа вольфрамової нитки лампи розжарювання. Підставляючи R_3 з формули (14) і R_3^* з формули (6) у формулу (13), отримаємо формулу розрахунку ПЗ для СТ:

$$\alpha = \frac{IU}{\sigma T^4 S}, \quad (15)$$

В умовах даного експерименту випромінювальна здатність пропорційна яскравості тіла. За законом Стефана-Больцмана інтегральна яскравість (ІЯ) для АЧТ:

$$B_{АЧТ} = \frac{1}{\pi} \sigma T^4, \quad (16)$$

де стала Стефана-Больцмана $\sigma = 5,71 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$.

Тоді ІЯ для АСТ:

$$B_{АСТ} = \frac{1}{\pi} a \sigma T^4, \quad (17)$$

де a – ПЗ для АСТ.

Крок 3. Виконання розрахунків. На рис.6 зображені курсанти Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія» в лабораторії фізики під час виконання розрахунків в табличному онлайн-редакторі Google Sheets.

За формулою (15) курсанти розрахували значення ПЗ для АСТ $a = 0,4465$.

За формулою (17) розраховано значення ІЯ для АСТ $B_{АСТ} = 18992,4725$.

Отримані значення ПЗ та ІЯ для АСТ цілком підтверджують теоретичні положення квантової фізики, та наочно демонструють принцип дії пірометрів.

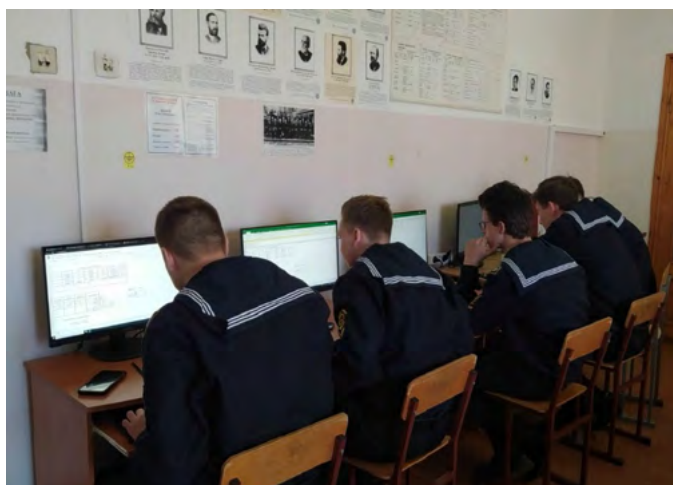


Рис. 6. Курсанти під час виконання розрахунків

Крок 4. Формування питань для пошуку інформації щодо застосування пірометрів у суднових системах за допомогою ChatGPT. На запит викладача ChatGPT запропонував такі питання для пошуку інформації:

1. Які основні принципи роботи суднових пірометрів та як вони можуть бути використані на морських суднах?
2. Які параметри можуть бути виміряні за допомогою суднових пірометрів, та як ці дані можуть бути використані для моніторингу технічного стану судна?
3. Які види пірометрів найчастіше використовуються на морських суднах, та які переваги та недоліки мають ці пристрої?
4. Які чинники можуть впливати на точність вимірювання температури за допомогою суднових пірометрів, та як ці фактори можуть бути враховані при їх використанні?
5. Які інші технічні засоби можуть використовуватися для вимірювання температури на морських суднах та які переваги та недоліки мають ці пристрої порівняно з судовими пірометрами?
6. Які відомі класи пірометрів за виконуваними функціями, застосуванням в системах, та вартістю.
7. Назвіть відомі компанії-виробники пірометрів, які використовуються на морських суднах, та дайте посилання на сайти компаній.

Отримані питання були запропоновані курсантам для пошуку інформації.

Крок 5. За допомогою ChatGPT пошук інформації щодо застосування пірометрів у суднових системах. Для пошуку інформації ChatGPT курсанти зареєструвалися на ресурсі [5]. Процес реєстрації дуже простий та займає кілька хвилин. Кожний курсант в процесі спілкування з ChatGPT отримав докладну відповідь на одне запитання.

Крок 6. Перевірка інформації щодо застосування пірометрів у суднових системах.

– Інформація, надана ChatGPT, була перевірена з використанням навчального посібника [8], і визнана достовірною, за винятком наданих ChatGPT посилань

на сайти. Перевірка посилань показала, що із дев'яти посилань шість посилань (66%) виявилися непрацюючими. На наш погляд, дві третини посилань встигли застаріти за час навчання та випробування системи ШІ.

Крок 7. Аналіз інформації щодо застосування пірометрів у суднових системах. Пірометри використовуються на судах для контролю температури різного обладнання та систем для забезпечення безпечної та ефективної роботи. Виходячи з функціональності та систем застосування, судові пірометри можна класифікувати наступним чином:

– *Пірометри безконтактні* призначені для вимірювання температури поверхонь без контакту з ними. Вони використовуються для вимірювання температури компонентів, до яких важко дістатися, таких як системи вихлопних газів та котли. Це інфрачервоні пірометри та волоконно-оптичні пірометри.

– *Пірометри контактні* призначені для вимірювання температури поверхонь при безпосередньому контакті. Вони використовуються для вимірювання температури компонентів двигуна, таких як поршні, підшипники та вали, і містять у своєму складі терморезистори та резистивні датчики температури (resistance temperature detectors RTDs).

– *Пірометри вихлопних газів* застосовуються для контролю продуктивності і температури вихлопних газів судового двигуна.

– *Пірометри котлів* використовуються для забезпечення його безпечної та ефективної роботи.

– *Пірометри судових турбін* використовуються для контролю продуктивності та забезпечення безпечної роботи.

– *Пірометри судових печей* використовуються для забезпечення безпечної та ефективної роботи.

Пірометрам властиві такі *переваги*:

1) *точність вимірювання* – пірометри точно вимірюють високі температури, що важливо для моніторингу обладнання морських і річкових суден;

2) *безконтактність вимірювання* – пірометри не потрібно фізично вставляти у вимірюване обладнання. Це необхідно для обладнання, до якого важко отримати доступ, або там, де введення температурного зонду може бути небезпечним;

3) *висока швидкість вимірювання* – пірометри забезпечують швидкі покази температури, що може бути дуже корисним для виявлення змін температури, які можуть вказувати на проблему з обладнанням;

4) *портативність та простота* у використанні, що робить їх зручним інструментом для контролю температури.

Пірометрам властиві такі *недоліки*:

1) *обмежений діапазон* вимірювань – пірометри обмежені не здатні точно вимірювати занадто низькі або занадто високі температури поза діапазоном;

2) *чутливість до умов* навколишнього середовища – пилю, вологість і вібрації можуть впливати на точність вимірювання;

3) *необхідність калібрування* – пірометри потрібно періодично калібрувати, щоб забезпечити їх точність, що може зайняти багато часу і може вимагати спеціалізованого обладнання;

4) *висока вартість* – пірометри можуть бути відносно дорогими, особливо моделі з більш високою точністю і більш широкими температурними діапазонами.

Вартість різних моделей пірометрів змінюється залежно від різних факторів, таких як точність пристрою, діапазон вимірювань та додаткові функції, такі як можливості реєстрації даних. *Базова модель* пірометра з одним температурним зондом і простим дисплеєм може коштувати від \$100 до \$200. *Модель середнього класу* з декількома температурними зондами та цифровим дисплеєм може коштувати від \$300 до \$500. *Високоякісна модель* з декількома температурними зондами, можливостями реєстрації даних та розширеними функціями, такими як підключення Bluetooth, може коштувати від \$700 до \$1000 або більше. *Модель професійного класу* з високою точністю, декількома температурними зондами та додатковими функціями, такими як аналіз даних в режимі реального часу та налаштовані сигнали тривоги можуть коштувати понад \$1000. Наведена вартість є приблизною, і може змінюватися в залежності від марки, моделі та додаткових функцій. Також мають бути враховані витрати на встановлення та калібрування пірометрів.

Найчастіше на суднах застосовуються пірометри вихлопних газів та пірометри котлів, через їх важливість у моніторингу температури двигуна та котла для безпечної та ефективної роботи. Найвідоміші у світі виробники пірометрів для судових систем – це американські компанії «FLIR Systems», «Raytek», «Williamson Corporation», британська «Land Instruments International», німецька «Optris».

Крок 8. Розробка класифікації пірометрів судових систем. Проведений аналіз дозволив курсантам сформувавши багатоаспектну класифікаційну схему пірометрів (рис. 7) у текстовому онлайн-процесорі *Google Docs* [9].

Крок 9. За допомогою ChatGPT створення тестів для перевірки знань курсантів щодо застосування пірометрів у судових системах. На запит викладача *ChatGPT* сформував тести з трьома варіантами відповідей стосовно застосування пірометрів в судових системах:

1. Який принцип роботи мають судові пірометри? а) Вимірюють температуру за допомогою контактних елементів б) Вимірюють температуру за допомогою інфрачервоного випромінювання с) Вимірюють температуру за допомогою мікрохвильового випромінювання (рис. 7).

2. Які параметри температури можуть бути виміряні за допомогою судових пірометрів? а) Тільки температура повітря б) Тільки температура металевих поверхонь с) Температура повітря, металевих поверхонь та інших матеріалів.

3. Як можуть бути використані дані з судових пірометрів для моніторингу технічного стану судна? а) Для вимірювання температури палива б) Для вимірювання температури води у системі охолодження с) Для вимірювання температури трубопроводів та інших компонентів судна.

4. Який фактор може впливати на точність вимірювання температури за допомогою судових пірометрів? а) Відстань між судном та об'єктом вимірювання б) Кут нахилу судна відносно об'єкту вимірювання с) Відстань між пірометром та об'єктом вимірювання.

5. Який інший технічний засіб може бути використаний для вимірювання температури на морських суднах порівняно з судовими пірометрами? а) Термометр з плаваючою стрічкою б) Термопара с) Градусник з ртуттю.

На запит викладача *ChatGPT* сформував правильні відповіді на тести: 1-й тест б) Вимірюють температуру за допомогою інфрачервоного випромінювання;

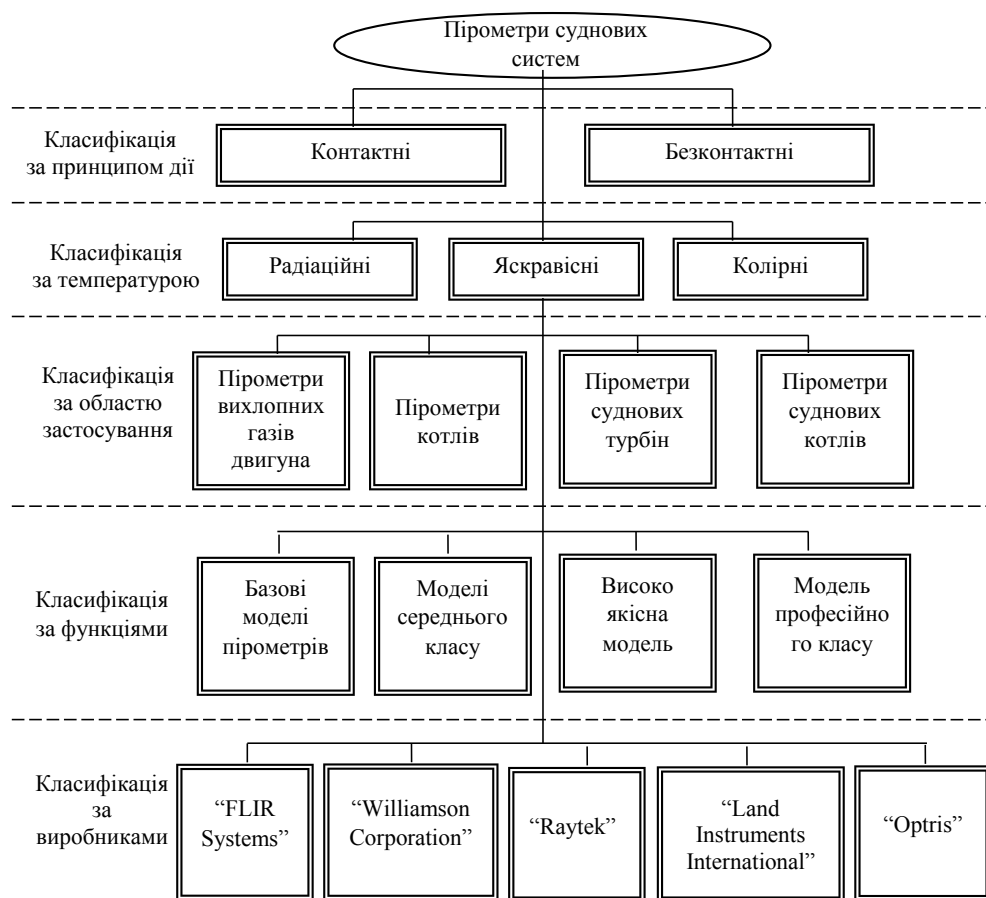


Рис. 7. Багатоаспектна класифікаційна схема пірометрів суднових систем

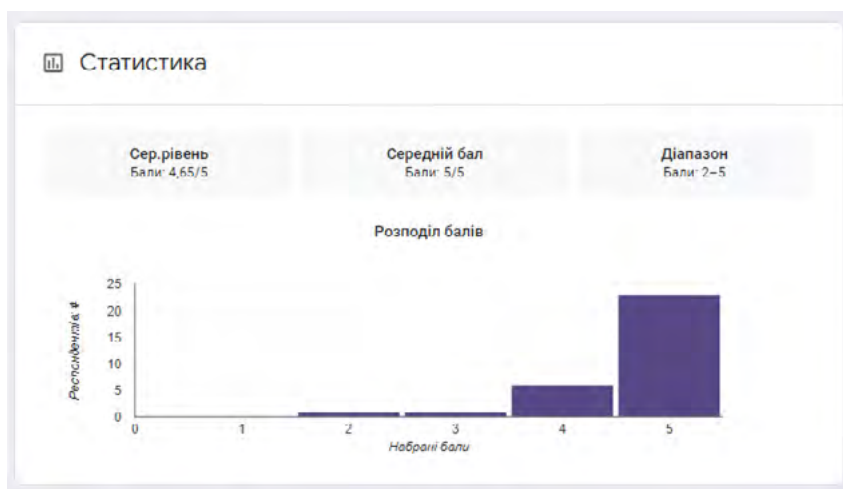


Рис. 8. Результати тестування знань курсантів за тестами від ChatGPT

2-й тест с) Температура повітря, металевих поверхонь та інших матеріалів; 3-й тест с) Для вимірювання температури трубопроводів та інших компонентів судна; 4-й тест а) Відстань між судном та об'єктом вимірювання; 5-й тест б) Термопара.

Крок 10. Контроль знань курсантів з використанням тестів від ChatGPT. Тестування проводилось за допомогою програмного забезпечення адміністрування опитування Google Forms [10]. Отримані результати тестування показані на рис. 8.

Результати тестування показують, що більшість курсантів відповіли правильно на всі п'ять запитань, середній бал становить 4,65 за п'ятибальною шкалою, що засвідчує високий рівень знань курсантів з даної теми.

Таким чином, власноруч проведений курсантами наочний фізичний експеримент, автоматизація розрахунків в Google Sheets, залучення мовної моделі ШІ ChatGPT до пошуку інформації, аналіз інформації, побудова класифікації пірометрів судових систем в Google Docs, та використання тестів від ChatGPT для контролю знань курсантів в Google Forms – всі ці активності загалом підвищили рівень розвитку фахових компетентностей майбутніх морських інженерів, і забезпечили підвищення: 1) абсолютної успішності (відношення кількості курсантів, що склали іспит з фізики, до загальної кількості курсантів у групі) на 16%; 2) якості навчання (відношення кількості курсантів з оцінкою «добре» та «відмінно» до загальної кількості курсантів на іспиті) на 11%.

Висновки. В роботі обґрунтована необхідність поглиблення знань та розумінь законів, явищ та процесів теплового випромінювання шляхом проведення курсантами фізичного експерименту. Описана проблема недостатнього зв'язку між теоретичними знаннями курсантів-судномеханіків законів теплового випромінювання та їх практичним застосуванням в пірометрах судових систем.

Проведений аналіз літературних джерел дозволив визначити фізичні величини, моделі, основні закони та методи визначення температур нагрітих тіл, які використовуються в пірометрах для контролю температури різноманітного судового обладнання з метою забезпечення його безпечної та ефективної роботи.

Розроблена покрокова методика, яка описує: лабораторне дослідження явища теплового випромінювання; виконання розрахунків поглинальної здатності та інтегральної якравості для АСТ в табличному онлайн-редакторі Google Sheets; пошук за допомогою системи ШІ ChatGPT інформації щодо характеристик, особливостей, переваг, недоліків та областей застосування пірометрів у судових системах; аналіз інформації та розробку багатоаспектної класифікаційної схеми пірометрів судових систем. Під час обговорення курсантами можливостей ChatGPT визначені переваги системи: простота використання, швидкість надання запитаної інформації, допомога у виконанні різноманітних завдань. Водночас курсантами відмічена неможливість використання ШІ без участі людини в складних системах управління через неможливість передбачення та навчання системи для усіх можливих комбінацій ситуацій та подій.

Запропонована методика апробована на лабораторних заняттях з фізики у групі курсантів-судномеханіків з досягненням позитивного результату. Проведення фізичного експерименту, автоматизація розрахунків та залучення мовної моделі ШІ ChatGPT до розвитку фахових компетентностей майбутніх морських інженерів

дали змогу підвищити абсолютну успішність на 16% та якість навчання на 11%, що було встановлено за результатами іспитів.

В роботі застосований крос-дисциплінарний підхід, який поєднує теоретичні знання та практичні навички в області фізики, інформаційних технологій та системного аналізу. Подальша робота буде спрямована на дослідження та апробацію методів ефективного використання систем ШІ в навчальному процесі здобувачами освіти та викладачами, з визначенням ступеню доцільності використання методів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Михайленко В.І., Білоус В.М., Поповський Ю.М. Загальна фізика : навчальний посібник. Одеса : ВидавІнформ ОНМА, 2012. 475 с.
2. Петченко О.М., Сисоєв А.С., Назаренко Є.І. Загальні основи фізики. Навчальний посібник з курсу «Фізика». Харків : ХНУМГ, 2007. 224 с.
3. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: У 3 т. : навч. посіб. для студ. вищ. техн. і пед. закл. освіти. Т. 3. Оптика. Квантова фізика / за ред. І.М. Кучерука. Київ : Техніка, 1999. 520 с.
4. Як працювати з Google Spreadsheets. URL: <https://netpeak.net/uk/blog/povniy-gayd-iz-roboti-z-google-spreadsheets/> (дата звернення: 01.04.2023).
5. Welcome to ChatGPT. URL: <https://chat.openai.com/> (дата звернення: 01.02.2023).
6. Посібник з ChatGPT: Шість основних стратегій швидкого введення запитів для кращих результатів. URL: https://24tv.ua/tech/shist-strategiy-efektivnogo-vvedennya-zapitiv-dlya-krashhih-rezultativ_n2261585 (дата звернення: 01.04.2023).
7. Як використовувати ChatGPT для навчання. П'ять етичних способів, які будуть для вас корисними. URL: <https://techno.nv.ua/ukr/it-industry/chatgpt-dlya-navchannya-50316103.html> (дата звернення: 01.04.2023).
8. Виноградов-Салтиков В.О., Єщенко О.І., Бірюков Д.В. Особливості вимірювання температури пірометрами. Навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 35 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/47724/1/Teplotekhnichni_vymiruvannia_Osoblyvosti_vymiruvannia_temperatury_pirometramy.pdf (дата звернення: 01.04.2023).
9. Як користуватись Google Docs? ІНСТРУКЦІЯ. URL: <https://cybercalm.org/novynu/yak-korystuvatys-google-docs-instruktsiya/> (дата звернення: 01.04.2023).
10. Google Forms – від простого до найпростішого. URL: <https://elit-web.ua/ua/blog/google-forms> (дата звернення: 01.04.2023).

REFERENCES

1. Mihajlenko, V.I., Bilous, V.M., Popovskij, Yu.M. (2012). General Physics: Tutorial [Zagalna fizyka: Navchalnyj posibnyk]. – Second edition, revised and supplemented – Odessa: VydavInform ONMA, 475 p. [in Ukrainian].
2. Petchenko O.M., Sysoiev A.S., Nazarenko Ye.I., Bezuhlyi A.V. (2007) General fundamentals of physics. Textbook on the course "Physics"

- [Zahalni osnovy fizyky. Navchalnyi posibnyk z kursu «Fizyka»]. – Kharkiv: Kharkiv National University of Urban Economy, 224 p. [in Ukrainian].
3. Kucheruk I.M., Horbachuk I.T. (1999) General physics course: In 3 volumes: a textbook for students of higher technical institutions of education. Volume 3. Optics. Quantum physics [Zahalnyi kurs fizyky: U 3 tomakh: navchalnyi posibnyk dlia studentiv vyshchych tekhnichnykh zakladiv osvity. T.3. Optyka. Kvantova fizyka]. / Edited by I.M. Kucheruk. – Kyiv: Tekhnika, 520 p. [in Ukrainian].
 4. NETPEAK JOURNAL (2023). How to work with Google Spreadsheets [Iak pratsiuvaty z Google Spreadsheets]. Retrieved from: <https://netpeak.net/uk/blog/povniy-gayd-iz-roboti-z-google-spreadsheets/> [in Ukrainian].
 5. CHATGPT (2023). New chat. Retrieved from: <https://chat.openai.com/> [in English].
 6. CHATGPT GUIDE (2023). Six main strategies for quickly entering queries for better results [Posibnyk z ChatGPT: Shist osnovnykh stratehii shvydkoho vvedennia zapytiv dlia krashchych rezultativ]. Retrieved from: https://24tv.ua/tech/shist-strategiy-efektivnogo-vvedennya-zapitiv-dlya-krashchih-rezultativ_n2261585 [in Ukrainian].
 7. NEW VOICE TECHNO (2023). How to use ChatGPT for training. Five ethical ways that will be useful for you [Iak vykorystovuvaty ChatGPT dlia navchannia. Piat etychnykh sposobiv, yaki budut dlia vas korysnymy]. Retrieved from: <https://techno.nv.ua/ukr/it-industry/chatgpt-dlya-navchannya-50316103.html> [in Ukrainian].
 8. Vynogradov-Saltykov V.O., Yeshchenko O.I., Biriukov D.V. (2022) Features of temperature measurement by pyrometers. Tutorial [Osoblyvosti vymiriuvannia temperatury pirometry. Navchalnyi posibnyk]. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 358 p. Retrieved from: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/47724/1/Teplotekhnichni_vymiriuvannia_Osoblyvosti_vymiriuvannia_temperatury_pirometry.pdf [in Ukrainian].
 9. CYBERCALM (2023). How to use Google Docs? INSTRUCTION [Iak korystuvatys Google Docs? INSTRUKTSIA]. Retrieved from: <https://cybercalm.org/novyiny/yak-korystuvatys-google-docs-instruktsiya/> [in Ukrainian].
 10. ELIT-WEB (2023). Google Forms – from simple to simple [Google Forms – vid prostoho do naiprostishoho]. Retrieved from: <https://elit-web.ua/ua/blog/google-forms> [in Ukrainian].

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 164.01:656.073

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2023.3-18.16>

ЛОГІСТИЧНИЙ ПІДХІД ДО ОПТИМІЗАЦІЇ МІЖНАРОДНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Н.Т. Кунда¹, Д.Д. Наумовець²

¹к.т.н., доцент, професор кафедри міжнародних перевезень та митного контролю,
Національний транспортний університет, Київ, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-7290-7267

²магістр факультету транспортних та інформаційних технологій,
Національний транспортний університет, Київ, Україна

Анотація

Вступ. Використання принципів логістики для удосконалення доставки вантажів представляється важливим завданням для підприємств, що займаються міжнародними перевезеннями. Складність процесу транспортування вантажів викликала появу окремого напрямку діяльності – транспортної логістики. Як наука вона впливає на ефективність процесу доставки та забезпечення задоволення потреб клієнтів. **Мета:** проаналізувати та систематизувати логістичні підходи до оптимізації міжнародних автомобільних перевезень вантажів. **Результати.** Ефективне надання логістичних послуг на автотранспортних підприємствах здійснюється через дотримання правил «7 richtig»: потрібний товар необхідної кількості та установленої якості має бути поставлений з мінімальними затратами у вказане місце та узгоджений час саме тому клієнту, який його замовив. Аналіз процесу доставки вантажів саме автомобільним транспортом виявив певні проблеми та недоліки. Це високі витрати, затримки та нестабільність доставки, недостатня ефективність маршрутизації, труднощі зі складуванням та розвантаженням, недостатня інформаційна підтримка. Систематизовано кілька варіантів логістичних підходів для вирішення проблем: використання сучасних технологій інформаційної системи управління логістикою, вдосконалення маршрутизації та планування доставки, застосування інтермодального транспорту, вдосконалення інфраструктури та терміналів, установа партнерських відносин та співпраця з іншими логістичними операторами. **Висновки.** Логістичні інформаційні системи забезпечують стеження за вантажем та покращують планування та координацію доставки. Навігаційні супутникові системи виявляють оптимальні маршрути та ресурси. Комбінація різних видів транспорту дозволяє зменшити витрати, в тому числі логістичні, знизити екологічний вплив на довкілля. Модернізація терміналів забезпечує більш швидке та ефективне оброблення вантажів. Партнерські відносини між логістичними операторами сприяють ширшому охопленню ринку та покращенню

якості транспортного обслуговування. Системне впровадження логістичних підходів має великий потенціал для підвищення ефективності та конкурентоспроможності транспортних підприємств.

Ключові слова: міжнародні автомобільні перевезення, транспортна логістика, доставка вантажів, логістичні підходи, оптимізація.

LOGISTICS APPROACH TO OPTIMIZATION OF INTERNATIONAL ROAD TRANSPORTATION

N.T. Kunda¹, D.D. Naumovets²

¹PhD, Associate Professor, Professor at the Department of International Transportation and Customs Control,

National Transport University, Kyiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-7290-7267

²Master at the Faculty of Transport and Information Technologies,
National Transport University, Kyiv, Ukraine

Summary

Introduction. The use of logistics principles to improve the delivery of goods seems to be an important task for enterprises engaged in international transportation. The complexity of the process of cargo transportation has led to the emergence of a separate area of activity – transport logistics. As a science, it influences the efficiency of the delivery process and ensures customer satisfaction. **Purpose.** to analyze and systematize logistics approaches to optimizing international road transportation of goods. **Results.** The efficient provision of logistics services at road transport enterprises is carried out through compliance with the ‘7 richtig’ rules: the right product of the required quantity and quality must be delivered at minimum cost to the specified place and at the agreed time to the client who ordered it. An analysis of the process of delivering goods by road has revealed certain problems and shortcomings that need to be addressed. These include high costs, delays and instability of delivery, insufficient routing efficiency, difficulties with storage and unloading, and insufficient information support. Several variants of logistics approaches to solving the problems are systematized: the use of modern technologies of the logistics management information system, improvement of routing and delivery planning, use of intermodal transport, improvement of infrastructure and terminals, the establishment of partnerships and cooperation with other logistics operators. **Conclusions.** Logistics information systems provide cargo tracking and improve delivery planning and coordination. Navigation satellite systems identify optimal routes and resources. The combination of different modes of transport helps to reduce costs, including logistics costs. Modernization of terminals ensures faster and more efficient cargo handling. Partnerships between logistics operators contribute to wider market coverage and improved quality of transportation services. The systematic implementation of logistics approaches has great potential to increase the efficiency and competitiveness of transport companies.

Key words: international road transportation, transport logistics, cargo delivery, logistics approaches, optimization.

Постановка проблеми. У сучасному світі міжнародна торгівля набула великого значення для розвитку економіки та задоволення потреб суспільства. Важливим аспектом міжнародної торгівлі є ефективна та швидка доставка вантажів. Удосконалення доставки вантажів автомобільним транспортом з використанням принципів логістики стає надзвичайно важливим завданням для підприємств, що займаються міжнародними перевезеннями вантажів.

Незважаючи на те, що і понині у спеціальній літературі немає чіткого визначення поняття «логістика» та існує декілька десятків означень, у загальному її розглядають як науку про планування, організацію та інформацію про переміщення товарів від постачальника до споживача [1]. За одним із означень, логістика – це мистецтво доставляти товари у необхідній кількості у вказане місце за визначений термін з найменшими затратами. Однак існують проблеми чіткої організації планування і управління виробництвом, підготовки товару до транспортування, які потребують спільного рішення [2; 3]. Наразі логістика є основним напрямком удосконалення транспортного обслуговування у сферах виробництва, розподілу і споживання товарів. Логістика як наука та практика керування потоками товарів, інформації та послуг впливає на ефективність процесу доставки вантажів та забезпечення задоволення потреб клієнтів, тому оцінка її стану, дослідження напрямків розвитку є актуальним завданням.

Аналіз останніх публікацій. Загальні засади розвитку логістики як науки, функціонування транспортних логістичних систем закладені у багатьох працях зарубіжних і вітчизняних вчених, таких як Д. Дж. Бауерокс, Д. Дж. Клосс, Дж.Р. Сток, Е. Барді, Дж. Паф, М. Крістофер, Д.М. Ламберт, А. Гаджинський, Є. Крикавський, О. Горбенко, Ю. Пономарьова та інші. Вплив логістики як інструменту менеджменту на конкурентоспроможність підприємств досліджують М. Данько, С. Панченко, А. Новікова, Т. Маселко та ін. Незважаючи на велику кількість публікацій, проблеми ефективного надання логістичних послуг на автотранспортних підприємствах потребують подальших досліджень.

Метою статті є виявлення проблем та недоліків у поточному стані доставки вантажів саме автомобільним транспортом у міжнародному сполученні та розробка пропозицій щодо їх удосконалення з використанням принципів логістики. Це дозволить забезпечити більш ефективний, швидкий та надійний процес доставки вантажів, що сприятиме підвищенню конкурентоспроможності підприємств та задоволенню потреб клієнтів. Мета дослідження: проаналізувати, сформулювати та систематизувати логістичні підходи до оптимізації міжнародних автомобільних перевезень вантажів.

Виклад основного матеріалу. Розрізняють окремі види логістики, як то логістика запасів, виробнича, закупівельна, інформаційна, митна, складська, а також транспортна логістика – система організації переміщення вантажів за оптимальним маршрутом, яка має свої специфічні завдання та проблеми [4] і яку можна реалізувати за певними принципами, наприклад, так званими правилами логістики “7R – 7 richtig” (рис. 1).

Правило 1 вказує, що клієнту потрібен тільки той товар, за який він готовий сплатити; за умови виконання правила число споживачів товару ніколи не зменшиться, а можливо, і збільшиться. Правило 2 регламентує поставку товару



Рис. 1. Правила логістики “7R – 7 richtig”

необхідної кількості, вказаної клієнтом. Правило 3 вимагає, щоб клієнту доставляли товар установленної якості при збереженні всіх властивостей і характеристик. Правило 4 вимагає, щоб товар був поставлений тільки в місце, вказане клієнтом. Правило 5 вимагає, щоб товар був доставлений тільки в час, узгоджений з клієнтом. Правило 6 говорить про те, що додаткові витрати на доставку товару мають бути мінімізовані. Правило 7 вимагає від постачальника, щоб товар був доставлений саме тому клієнту, який його замовив.

Стверджується, що тільки за умови виконання усіх семи правил логістика як наука досягає свої практичної мети. Тому є життєздатною робоча гіпотеза: застосування принципів логістики в удосконаленні доставки вантажів автомобільним транспортом у міжнародному сполученні сприятиме зменшенню часу доставки, зниженню витрат та збереженню якості товару, що позитивно впливатиме підвищенню конкурентоспроможності підприємств та задоволенню потреб клієнтів.

Згідно з ціллю статті проаналізовано поточний стан процесу доставки вантажів автомобільним транспортом у міжнародному сполученні та виявлено проблеми та недоліки, що є найбільш поширеними.

Високі витрати. Доставка вантажів автомобільним транспортом у міжнародному сполученні часто супроводжується значними витратами, які включають витрати на паливо та ПММ, оплату роботи водіїв, митні та інші збори, витрати, пов'язані з перетином кордону, страхуванням, оформленням супровідної документації. Як наслідок, високі витрати можуть негативно впливати на прибутковість підприємств та збільшувати вартість товарів для кінцевих споживачів.

Затримки та нестабільність доставки. Однією з основних проблем в доставці вантажів автомобільним транспортом у міжнародному сполученні є часті затримки. Це може бути пов'язано зі складнощами при перетині кордонів, недостатнім плануванням маршрутів, неправильним вибором пунктів завантаження та розвантаження, а також несприятливими погодними умовами. Як наслідок, нестабільність доставки може призводити до порушення ланцюга поставок та недовіри з боку клієнтів.

Недостатня ефективність маршрутизації. В процесі доставки вантажів автомобільним транспортом не завжди вдається використати оптимальні маршрути. Відсутність ефективної маршрутизації може бути пов'язана з обмеженнями на дорогах та відсутністю точної інформації про дорожні умови, зокрема, через бойові дії, та недостатнім моніторингом транспортних засобів. Як наслідок, це може призводити до подовження маршруту, часових затримок та збільшення витрат на паливо.

Труднощі зі складуванням та розвантаженням. У міжнародній доставці вантажів можуть виникати проблеми зі складуванням та розвантаженням на терміналах та пунктах призначення. Як наслідок, недостатні ресурси для швидкого розвантаження, неефективне управління складським простором та недостатня підготовка майданчиків можуть призводити до затримок та порушення графіку доставки.

Недостатня інформаційна підтримка. У деяких випадках інформація про стан доставки та місцезнаходження вантажів може бути недостатньою або неправдивою. Це ускладнює відстеження вантажів та вчасне реагування на можливі проблеми. Як наслідок, відсутність точної та надійної інформації може призводити до недовіри з боку клієнтів та ускладнювати управління логістичними процесами.

Ці проблеми та недоліки у поточному стані доставки вантажів автомобільним транспортом у міжнародному сполученні потребують усунення та вирішення. Використання принципів логістики може допомогти оптимізувати витрати, зменшити затримки, покращити маршрутизацію, забезпечити ефективне складування та розвантаження, а також забезпечити надійну інформаційну підтримку.

Орієнтуючись на основні завдання транспортної логістики [4] і враховуючи, що спектр логістичних підходів є досить широкий, зосередимося лише на тих, що видаються для організації автомобільного перевезення вантажів у міжнародному сполученні найбільш результативними. Для вибору ефективних рішень запропонуємо для розгляду наступні варіанти логістичних підходів:

1. Використання сучасних технологій інформаційної системи управління логістикою.
2. Удосконалення маршрутизації та планування доставки.
3. Застосування інтермодального транспорту.
4. Удосконалення інфраструктури та терміналів.
5. Встановлення партнерських відносин та співпраця з іншими логістичними операторами.

1. Використання новітніх технологій інформаційної системи управління логістикою (інакше – логістичної інформаційної системи ЛІС) є одним з ключових варіантів удосконалення доставки вантажів автомобільним транспортом у міжнародному сполученні. Інформація є ключовим елементом логістичних операцій, а ЛІС являє собою автоматизовану систему управління логістичними процесами. Раціональне впровадження та ефективне використання таких систем дозволяє покращити контроль за логістичними процесами, забезпечити точну та актуальну інформацію про рух вантажів, спростити комунікацію з учасниками логістичного ланцюга та підвищити загальну ефективність доставки. Серед сучасних інформаційних технологій виділяють автоматизовані системи управління АСУ, інтегровані системи управління ІСУ, корпоративні інформаційні системи КІС, класичну

логістичну концепцію MRP (Material Requirements Planning), гнучку систему взаємодії з клієнтами CRM (Customer Relationship Management), перспективну концепцію IBP (Integrated Business Planning), що охоплює завдання автоматизації управління підприємством на базі системи управління знаннями і нейронних мереж [5–7].

1а) Одною з головних задач інформаційної системи управління логістикою є *моніторинг вантажів та контроль їх руху*, що досягається шляхом використання технологій GPS (Global Positioning System), супутникового відстеження та інших сучасних засобів моніторингу. Інформація про місцезнаходження вантажу та його статус передається в реальному часі до центральної системи. Це дозволяє операторам логістичної компанії та клієнтам отримувати актуальну інформацію про хід доставки.

1б) Вагомою перевагою використання інформаційних систем є *можливість автоматизації процесів*, пов'язаних з управлінням логістичними операціями. Інформаційні системи управління логістикою дозволяють автоматично генерувати документи, такі як замовлення на вантажоперевезення, накладні та рахунки-фактури. Це спрощує процеси оформлення та зменшує ймовірність помилок.

1в) Інформаційні системи надають *можливість координації роботи* різних учасників логістичного ланцюга. Завдяки цим системам оператори логістичної компанії можуть легко спілкуватися з водіями, складами, митними службами та іншими стейкхолдерами, обмінюючись необхідною інформацією та оновленнями щодо стану доставки. Це сприяє швидкому реагуванню на можливі затримки або проблеми та дозволяє забезпечити вчасне коригування маршрутів та планів доставки.

1г) Важливою функцією таких систем є *збирання, обробка та аналіз великих обсягів даних*, пов'язаних з логістичними операціями. Аналітика даних та прогнозування може допомогти впроваджувати стратегії оптимального використання ресурсів, зменшення затрат та покращення якості обслуговування. Це дозволяє виявляти тенденції та приймати обґрунтовані рішення для поліпшення якості процесу доставки.

2. Удосконалення маршрутизації та планування доставки є одним з ключових аспектів доставки вантажів автомобільним транспортом у міжнародному сполученні з використанням принципів логістики. Цей процес включає аналіз, оптимізацію та вибір оптимальних маршрутів доставки, а також розподіл ресурсів для досягнення максимальної ефективності та задоволення вимог клієнтів. Для вдосконалення маршрутизації та планування доставки можна використовувати наступні підходи:

2а) *Збір та аналіз даних*. Для ефективної маршрутизації та планування доставки необхідно мати доступ до різноманітної інформації, такої як адреси вантажних точок, вага та обсяг вантажів, обмеження шляхів руху та митні процедури. Збір даних може бути здійснений за допомогою платформи інтернету речей (Internet of Things – IoT), а також інтеграції з базами даних клієнтів та інших учасників ланцюга постачання. Використання глобальних систем навігації є неофіційним стандартом управління транспортними потоками всіх авторитетних транспортно-логістичних компаній, як міжнародних (UPS, FedEx – США; TNT – Нідерланди; DHL, Militzer & Munch – Німеччина; Kuehne & Nagel – Швейцарія; FM-Logistic – Франція), так і вітчизняних (ЦТС «Ліски», Рапід, Укрінтеравтосервіс). Найбільш

придатною для потреб логістики, зокрема, для обслуговування міжнародного автомобільного транспорту, є глобальна навігаційна супутникова система GPS, яка використовується не лише для контролю місцезнаходження транспортного засобу, але й дозволяє точно планувати доставку, за необхідності втручаючись у процес перевезення, і навіть продавати товар «з коліс». GPS може інтегруватися з іншими геоінформаційними системами. Аналіз даних дозволяє виявити оптимальні маршрути та ресурси, враховуючи різні фактори, такі як трафік, витрати на паливо, терміни доставки та інші обмеження.

2б) *Використання географічних інформаційних систем.* ГІС є потужним інструментом для візуалізації та аналізу географічних даних, що включають мапи, шляхи руху, дорожні мережі та інші важливі елементи дорожньої інфраструктури. Застосування ГІС дозволяє оптимізувати маршрути, враховуючи різні фактори, такі як відстань, час, вартість проїзду та обмеження на шляхах. Врахування цих факторів дозволяє знизити витрати на паливо, скоротити час доставки і тим самим підвищити ефективність доставки. ГІС працюють і в складі технологічного комплексу «AVL-логістика-телематика». Під телематикою розуміють технічні рішення, пов'язані з диспетчеризацією перевезень, а термін AVL (Automatic Vehicles Location) означає телематичні диспетчерські системи, які виконують логістичні операції по обслуговування перевезень [8].

2в) *Впровадження алгоритмів оптимізації.* Використання алгоритмів оптимізації дозволяє знайти оптимальні рішення щодо маршрутизації та планування доставки. Ці алгоритми враховують різні параметри, такі як вага вантажів, вартість доставки, обмеження шляхів та інші фактори. Використання оптимізаційних алгоритмів дозволяє знизити витрати на доставку, мінімізувати кількість пройдених кілометрів та забезпечити ефективне використання ресурсів.

Прикладом практичної реалізації є система управління транспортним парком в реальному часі TrustTrack, розроблена міжнародною телекомунікаційною компанією Ruptela [9]. Це багатофункціональна платформа управління автопарком і GPS-стеження, що здійснює логістичну функцію фліт-менеджменту. TrustTrack забезпечує віддалений доступ до даних тахографів і карток водіїв; дозволяє зчитувати дані борт-комп'ютера через CAN-шину і визначати точне місцезнаходження автомобіля, кілометраж, запас пального і його витрати, рівень AdBlue, оберти двигуна; забезпечує зв'язок між водієм у дорозі та диспетчером, допомагає оперативно реагувати на необхідність зміни маршруту, вибирати найшвидші маршрути; контролює режим праці та відпочинку водія, чим запобігає штрафам за порушення правил ЄУТР; за допомогою модуля Eco Drive здійснює оцінку ефективності роботи водія за критеріями економії пального та стилю водіння з огляду на безпеку.

2г) *Врахування змінних умов.* При плануванні доставки в міжнародному сполученні необхідно враховувати змінні умови, такі як митні процедури, політична нестабільність, погодні умови та інші фактори, які можуть вплинути на час та ефективність доставки. Розробка гнучких планів, які можуть адаптуватись до змінних умов, дозволяє забезпечити стабільність та точність доставки.

2д) *Врахування пріоритетів клієнтів.* Клієнти можуть мати різні пріоритети щодо доставки, такі як терміновість, безпека або ціна. Удосконалення

маршрутизації та планування доставки повинно враховувати ці пріоритети та забезпечувати задоволення вимог клієнтів. Це може бути зроблено за допомогою використання пріоритетних алгоритмів та систем керування, які забезпечують надання переваг важливим вантажам та клієнтам.

3. Застосування інтермодального транспорту є одним із способів удосконалення доставки вантажів у міжнародному сполученні з використанням принципів логістики. Інтермодальний транспорт використовує для ефективної доставки від відправника до одержувача комбінацію різних видів транспорту, таких як автомобільний, залізничний, морський, річковий або повітряний [4; 10]. Інтермодальний транспорт має свої особливості, які можна використовувати в якості логістичних рішень.

3а) *Ефективне використання різних видів транспорту.* Інтермодальний транспорт дозволяє використовувати найбільш оптимальний вид транспорту для кожної ділянки маршруту доставки. Наприклад, довгі відстані можуть бути подолані морським або залізничним транспортом, а доставку від терміналу до кінцевого пункту – автомобільним. Це допомагає знизити витрати на паливо, скоротити час доставки та мінімізувати вплив на навколишнє середовище.

3б) *Підвищення надійності та безпеки доставки.* Використання інтермодального транспорту дозволяє уникнути залежності від одного виду транспорту. Якщо виникають проблеми або перешкоди на одній ділянці маршруту, доставку можна переключити на інший вид транспорту без значних затримок або втрат. Це забезпечує більш надійну та безпечну доставку вантажу до пункту призначення.

3в) *Оптимізація витрат і підвищення ефективності перевезень.* Інтермодальний транспорт дозволяє оптимізувати витрати на доставку вантажу. За допомогою принципів логістики вибираються оптимальні комбінації видів транспорту та маршрути, що сприяє зниженню витрат на паливо, в тому числі логістичних витрат, та зменшенню кількості порожніх пробігів [11].

3г) *Зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.* Застосування інтермодального транспорту сприяє зменшенню викидів CO₂ та інших шкідливих речовин, оскільки дозволяє використовувати більш екологічні види транспорту, такі як залізниця чи морський транспорт. Крім того, ефективне планування маршрутів та використання ресурсів допомагає зменшити затори на дорогах та знизити екологічний вплив автомобільного транспорту на довкілля.

3д) *Покращення обслуговування клієнтів.* Інтермодальний транспорт забезпечує широкий спектр послуг та більш гнучкий графік доставки, задовольняючи різні вимоги та пріоритети клієнтів. Це сприяє встановленню довгострокових та стабільних відносин з клієнтами, забезпеченню їх задоволеності та підвищенню конкурентоспроможності підприємства.

4. Удосконалення терміналів та інфраструктури є важливим елементом процесу покращення доставки вантажів автомобільним транспортом у міжнародному сполученні. Оптимізація терміналів та інфраструктури дозволить забезпечити ефективно та швидко обслуговування вантажів, знизити час простою транспортних засобів та витрати на перевезення. Розглянемо деякі конкретні аспекти вдосконалення терміналів та інфраструктури, що сприятимуть спрощенню виконання логістичних операцій.

4а) *Розширення та модернізація терміналів* – один з ключових кроків у вдосконаленні інфраструктури, що включає збільшення просторів для зберігання вантажів, встановлення сучасного обладнання для завантаження та розвантаження вантажів, покращення системи організації роботи на терміналі. Модернізація терміналів дозволить забезпечити більш швидке та ефективне оброблення вантажів, зменшити час очікування та підвищити якість обслуговування.

4б) *Впровадження спеціалізованих автоматизованих систем* в терміналах дозволяє значно підвищити ефективність та точність процесів обробки вантажів. Наприклад, використання систем сортування з використанням штрихкодів, баркодів та RFID-технологій дозволяє автоматично визначати місце розміщення вантажу і прискорює процес його пошуку та відправлення. Крім того, автоматизовані системи дозволяють зменшити ймовірність помилок та покращити зв'язок між терміналами та іншими учасниками логістичного ланцюжка.

4в) *Розробка інтегрованих інформаційних систем*, що об'єднують різні ланки логістичного ланцюжка, від терміналів до клієнтів, дозволяють забезпечити швидкий та ефективний обмін інформацією. До них відносять системи відстеження вантажів, електронний документообіг, електронні системи співпраці з партнерами, системи звітності. За допомогою таких систем можна отримати оперативну інформацію про стан вантажу, місцезнаходження, час доставки та багато іншого, що допомагає покращити планування та координацію доставки.

4г) *Використання нових технологій*, таких як Інтернет речей (Internet of Things, IoT), штучний інтелект (Artificial Intelligence, AI), автоматизовані системи управління та аналітика даних, може значно покращити ефективність та продуктивність терміналів. Наприклад, за допомогою IoT можна стежити за рухом та умовами зберігання вантажів в реальному часі, а AI може допомогти у виявленні оптимальних маршрутів та плануванні доставки. Аналітика даних дозволяє аналізувати великі обсяги інформації та знаходити оптимальні рішення для покращення роботи терміналів.

4д) *Забезпечення екологічності* – новітній аспект вдосконалення інфраструктури та терміналів, якого можна досягти шляхом впровадження екологічно чистих технологій та матеріалів, встановлення систем вторинної переробки відходів, ефективного використання енергії та водних ресурсів. Такий підхід дозволить знизити негативний вплив на навколишнє середовище та сприятиме створенню екологічно стабільної логістичної системи.

5. Установлення партнерських відносин та співпраця з іншими логістичними операторами є важливою ланкою удосконалення доставки вантажів автомобільним транспортом у міжнародному сполученні, що дозволяє забезпечити ширше охоплення ринку, покращити надійність доставки, а також знизити витрати та оптимізувати логістичні процеси. Проаналізуємо деякі можливості встановлення партнерських відносин та співпраці з іншими логістичними операторами:

5а) *Вибір партнерів*. Важливим кроком є вибір надійних та професійних партнерів у логістичній сфері. Необхідно враховувати такі фактори, як досвід роботи, ділова репутація, технічні можливості компанії та географічне покриття. Важливо забезпечити взаємну вигоду та відповідність цілям та цінностям обох сторін.

5б) *Укладання договорів та узгодження умов співпраці.* При встановленні партнерських відносин необхідно укласти договори, які визначають умови співпраці, включаючи обсяги перевезень, відповідальність за вантажі, розподіл витрат та прибутку. Важливо узгодити такі аспекти як терміни доставки, забезпечення якості та безпеки перевезень, відповідальність сторін у форс-мажорних обставинах, варіанти вирішення спорів.

5в) *Система обміну інформацією.* Для успішної співпраці з іншими логістичними операторами важливо мати систему обміну інформацією, яка дозволяє швидко та ефективно передавати дані про вантажі, маршрутизацію, час доставки та іншу необхідну інформацію. Це може бути реалізовано за допомогою електронних платформ, спільних баз даних або спеціалізованих систем обміну інформацією.

5г) *Спільне планування та координація.* Партнерські відносини передбачають для забезпечення ефективної доставки вантажів спільне планування та координацію дій, що включає вирішення питань щодо маршрутизації, розподілу вантажів, взаємного врахування і коригування графіків доставки та попередження про можливі зміни або затримки.

5д) *Взаємна підтримка та спільний розвиток.* Цей аспект може включати обмін досвідом, впровадження нових технологій та інновацій, спільну участь у проектах та розвиток нових ринків. Взаємна підтримка сприяє покращенню якості обслуговування та створенню конкурентних переваг на ринку.

Висновки. У межах дослідження проведено аналіз поточного стану доставки вантажів автомобільним транспортом у міжнародному сполученні; виявлено існуючі проблеми і недоліки, зокрема, недостатнє використання інформаційних технологій, неефективну маршрутизацію та планування доставки, високу вартість та тривалість доставки, недостатню координацію між різними логістичними операторами, недосконалу інфраструктуру терміналів; а також систематизовано логістичні підходи, що впливають на ефективність доставки. Аналіз розглянутих варіантів дозволив зробити наступні висновки щодо можливих результатів впровадження логістичних рішень.

Використання сучасних технологій інформаційної системи управління логістикою є ключовим фактором для поліпшення ефективності логістичних процесів. Виконуючи задачі моніторингу вантажів та контролю їх руху, автоматизації процесів управління логістичними операціями, координації роботи ланок логістичного ланцюга, аналізу великих обсягів даних, такі системи дозволяють автоматизувати обробку інформації, забезпечувати стеження за вантажем в режимі реального часу та покращувати планування та координацію доставки.

Вдосконалення маршрутизації та планування доставки вантажів вимагає використання комплексного підходу і включає аналіз різноманітної інформації, використання географічних інформаційних систем та систем AVL, впровадження оптимізаційних алгоритмів, врахування змінних умов та пріоритетів клієнтів, тим самим виявляючи оптимальні маршрути та зберігаючи ресурси.

Застосування інтермодального транспорту виявляє свої переваги шляхом ефективного використання різних видів транспорту та їх комбінацій, підвищення надійності та безпеки доставки, оптимізації витрат, зменшення негативного впливу на навколишнє середовище, покращення обслуговування клієнтів, забезпечуючи

таким чином гнучкість вибору транспортних маршрутів, оптимальне використання різних видів транспорту та зменшення витрат на доставку, високу конкурентоспроможність підприємства та задоволеність клієнтів.

Вдосконалення терміналів та інфраструктури полягає в розширенні та модернізації терміналів, покращенні інформаційного забезпечення, впровадженні екологічно чистих технологій для забезпечення ефективного та швидкого обслуговування вантажів, зменшення часу простою транспортних засобів та витрат на міжнародні перевезення, тобто задоволеності потреб клієнтів.

Встановлення партнерських відносин та співпраця з іншими логістичними операторами передбачає вибір надійних партнерів у логістичній сфері, регламентацію правових відносин, наявність системи обміну інформацією, спільне планування і координацію дій та взаємну підтримку, що дозволяють створити мережу ефективних логістичних послуг у сфері перевезень вантажів у міжнародному сполученні.

Отже, удосконалення доставки вантажів автомобільним транспортом у міжнародному сполученні з використанням принципів логістики має великий потенціал для підвищення ефективності та конкурентоспроможності логістичних послуг. Реалізація систематизованих у цій роботі логістичних підходів сприятиме поліпшенню системи доставки вантажів, зниженню витрат та забезпеченню задоволеності вимог клієнтів, а скоординоване впровадження сприятиме досягненню синергічного ефекту. Знаходження шляхів вирішення проблем транспортної логістики і практичної реалізації логістичних принципів має бути пріоритетним напрямком досліджень у сфері організації міжнародних автомобільних перевезень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Чимош К.С. Генезис поняття 'транспортна логістика'. *Агросвіт*. 2020. № 17–18. С. 119–122. URL: <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2020.17-18.119>.
2. Бауерокс Дональд Дж., Клосс Дейвід Дж. Логістика: Інтегрований ланцюг постачань / Пер. з англ. Н.Н. Барішнікової, Б.С. Пінкнера. 2004. 640 с.
3. Крикавський Є., Похильченко О., Фертч М. Логістика та управління ланцюгами поставок : підручн. Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2020. 848 с.
4. Поліщук І.І., Кушина Л.Р., Сташко М.М. Транспортна логістика як складова логістичної системи та її основні проблеми. *Молодий вчений*. 2016. № 12, грудень. С. 832–835.
5. Климюк А.О., Шталь Т.В. Аналіз особливостей інформаційних логістичних систем управління міжнародною діяльністю підприємства. *БІЗНЕСІНФОРМ*. 2017. № 12. С. 397–402. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-osoblivostey-informatsiynih-logistichnih-sistem-upravlinnya-mizhnarodnoyu-diyalnistyuu-pidpriemstva>.
6. Ткачова О.К., Литвинова М.С. Репешко А.С. Застосування автоматизованих систем управління підприємством у контексті розвитку цифрової економіки *Обліково-аналітичне забезпечення системи фінансово-економічної безпеки* : матеріали VIII міжнар. наук.-практ.

- інтернет-конф. ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, Харків, 19 лист. 2019 р.
URL: <https://ojs.kname.edu.ua/index.php/area/article/view/2377/2256>.
7. Integrated Business Planning Offers a Competitive Edge. 10.05.2022. URL: <https://intito.fi/integrated-business-planning-offers-a-competitive-edge/>.
 8. Кунда Н.Т. Організація міжнародних автомобільних перевезень : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. напряму «Транспортні технології». Київ : Видавничий Дім «Слово», 2010. 464 с. С. 341–347. URL: <https://drive.google.com/open?id=11Y6NtWnahAmbKXK3GyCWYE4xe-0y68Pk>.
 9. Ruptela. URL: <https://www.ruptela.ua/pro-nas/>.
 10. Боровик Т., Даниленко В. Транспортна логістика як фактор забезпечення зовнішньоекономічної діяльності вітчизняних підприємств. *Економічний простір*. 2022. № 177. С. 35–39. URL: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/177-6>.
 11. Савенко І.І., Седіков Д.В. Логістичний менеджмент, як інструмент оптимізації логістичних витрат. *Економіка харчової промисловості*. 2020. Т. 12. № 3. С. 42–50. URL: <https://doi.org/10.15673/fe.v12i3.1815>.

REFERENCES

1. Chimosh, K. S. (2020). Genesis of the concept of 'transport logistics'. [Genezis ponyattya 'transportna logistika'] *Agrosvit*. 17–18. 119–122. doi.org/10.32702/2306-6792.2020.17-18.119 [in Ukrainian].
2. Bowerox, Donald J., Kloss, David J. (2004). Logistics: The Integrated Supply Chain. 2nd edition Trans. from English Baryshnikova, N.N., Pinksner, B.S. [Logistika: Integrovanii lantsyug postachan.] 640 p. [in Ukrainian].
3. Krykavskiy E. V., Pokhilchenko O. A., Fertch M. (2020) Logistics and management of supply chains: textbook. [Logistika ta upravlinnya lantsyugami postavok] Lviv: Lviv Polytechnic. 848 p. [in Ukrainian].
4. Polishchuk, I.I., Kushina, L.R., Stashko, M.M. (2016) Transport logistics as a component of the logistics system and its main problems. [Transportna logistika yak skladova logistichnoyi sistemi ta yiyi osnovni problemi.] *A young scientist*. 12. 832–835 [in Ukrainian].
5. Klymiuk, A. O., Shtal T. V. (2017). Analysis of features of information logistics systems for managing the international activities of the enterprise [Analiz osoblivostey informatsiynih logistichnih sistem upravlinnya mizhnarodnoyu diyalnistyu pidpriemstva]. *Business Inform*. 12. 397–402 [in Ukrainian]. <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-osoblivostey-informatsiynih-logistichnih-sistem-upravlinnya-mizhnarodnoyu-diyalnistyu-pidpriemstva>
6. Tkachova, O. K., Litvynova, M. S. Repeshko, A. C. (2019). Application of automated enterprise management systems in the context of the development of the digital economy. [Zastosuvannya avtomatizovanih sistem upravlinnya pidpriemstvom u konteksti rozvitku tsifrovoyi ekonomiki] Materials VIII International science and practice Internet

- Conf. Kharkiv National University of Urban Economy named after Beketova [in Ukrainian]. <https://ojs.kname.edu.ua/index.php/area/article/view/2377/2256>
7. Integrated Business Planning Offers a Competitive Edge. 10.05.2022. URL: <https://intito.fi/integrated-business-planning-offers-a-competitive-edge/>
 8. Kunda, N.T. (2010). Organization of international road transportation: a study guide for students of higher educational institutions in the field of 'Transport Technologies'. [Organizatsiya mizhnarodnih avtomobilnih perevezen]. Kyiv: 'Slovo' Publishing House. 464 p. 341–347 [in Ukrainian]. <https://drive.google.com/open?id=11Y6NtWnahAmbKXXK3GyCWYE4xe-0y68Pk>
 9. Ruptela URL: <https://www.ruptela.ua/pro-nas/>
 10. Borovyk, T., Danylenko, V. (2022) Transport logistics as a factor in ensuring the foreign economic activity of domestic enterprises. [Transportna logistika yak faktor zabezpechennya zovnishnoekonomichnoyi diyalnosti vitchiznyanih pidpriemstv]. *Economic space*. 177. 35–39. doi.org/10.32782/2224-6282/177-6 [in Ukrainian].
 11. Savenko, I.I., Sedikov, D.V. (2020) Logistics management as a tool for optimizing logistics costs. [Transportna logistika yak skladova logistichnoyi sistemi ta yiyi osnovni problemi] *Economics of the food industry*. Vol. 12. 3. 42–50. doi.org/10.15673/fe.v12i3.1815 [in Ukrainian].

АПАРАТ МЕТОДОЛОГІЇ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СИСТЕМИ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Г.О. Примаченко¹, О.В. Шкуренко², В.А. Будник³, Є.І. Григорова⁴

¹к.т.н., доцент, доцент кафедри транспортних систем та логістики,
Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-7326-8997

²д.е.н., доцент, професор кафедри бізнес-логістики та транспортних технологій,
Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-0460-4800

³к.е.н., професор, професор кафедри бізнес-логістики та транспортних технологій,
Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-8936-0875

⁴аспірантка кафедри транспортних систем та логістики,
Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-4351-3263

Анотація

Вступ. У сучасних умовах розвиток мультимодальних перевезень вантажів є необхідною умовою для оптимізації роботи транспортної галузі, організації на сучасному технологічному рівні переміщення матеріальних потоків. А дослідження методології організації системи мультимодальних перевезень дозволяє здійснити наукове пізнання проблем у системі мультимодальних перевезень і оптимізувати їх. **Мета.** Стаття спрямована на визначення чинників, що впливають на ефективність діяльності транспортних підприємств під час здійснення мультимодальних перевезень вантажів на основі дослідження їх методології. **Результати.** Проаналізовано апарат методології дослідження системи мультимодальних перевезень. Обрано рівні методологічного аналізу системи мультимодальних перевезень. Авторами проведено порівняльний аналіз визначення поняття мультимодальні перевезення у різних джерелах. Досліджено основні переваги мультимодальних перевезень. Проведено аналіз основних схем мультимодальних перевезень. Досліджено сприйняття українськими компаніями-перевізниками Закону України «Про мультимодальні перевезення». **Висновки.** Розвиток мультимодальних перевезень є ключовим чинником підвищення ефективності транспортної галузі, удосконалення управління ланцюгами постачання послуг переміщення матеріальних потоків населенню, але потребує значних досліджень методології здійснення мультимодальних перевезень щодо оптимального використання логістичної інфраструктури різних видів транспорту. Ефективну взаємодію видів транспорту побудовано на основі використання саме залізничного транспорту як екологічного та масового перевізника. Розвиток мультимодальних перевезень є ключовим чинником підвищення ефективності розвитку транспортної галузі в Україні у сучасних умовах, удосконалення управління ланцюгами постачання послуг перевезень вантажів, але потребує дослідження

методології з метою оптимізації процесу формування мультимодальних маршрутів та узгодження дії усіх учасників мультимодального перевезення у часі.

Ключові слова: мультимодальні перевезення, методологічний аналіз, переваги мультимодальних перевезень, логістика.

METHODOLOGY APPARATUS OF SCIENTIFIC STUDIES OF THE SYSTEM OF MULTIMODAL TRANSPORTATION

H.O. Prymachenko¹, O.V. Shkurenko², V.A. Budnyk³, Ye.I. Hryhorova⁴

¹Candidate of Sciences (Technical), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine, ORCID ID: 0000-0001-7326-8997

²Doctor of Sciences (Economics), Associate Professor, Professor at the Department of Business Logistics and Transport Technologies, State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, Ukraine, ORCID ID: 0000-0002-0460-4800

³Candidate of Sciences (Economics), Professor, Professor at the Department of Business Logistics and Transport Technologies, State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, Ukraine, ORCID ID: 0000-0002-8936-0875

⁴Postgraduate Student at the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine, ORCID ID: 0000-0003-4351-3263

Summary

Introduction. In modern conditions, the development of multimodal cargo transportation is a necessary condition for optimizing the work of the transport industry, organizing the movement of material flows at a modern technological level. And the study of the methodology of the organization of the system of multimodal transportation allows to carry out scientific knowledge of the problems in the system of multimodal transportation and to optimize them. **Purpose.** The article is aimed at determining the factors affecting the efficiency of the activities of transport enterprises during the implementation of multimodal transportation of goods based on the study of their methodology. **Results.** The apparatus of the multimodal transportation system research methodology was analyzed. The levels of methodological analysis of the system of multimodal transportation have been chosen. The authors conducted a comparative analysis of the definition of the concept of multimodal transportation in various sources. The main advantages of multimodal transportation have been studied. An analysis of the main schemes of multimodal transportation was carried out. The perception of Ukrainian carrier companies of the Law of Ukraine «About Multimodal Transportation» was studied. **Conclusions.** The development of multimodal transportation is a key factor in increasing the efficiency of the transport industry, improving the management of supply chains for the movement of material flows to the population, but it requires significant research into the methodology of multimodal transportation regarding the optimal use of the logistics infrastructure of various types of transport. Effective interaction of modes of transport is built on the basis of the use of railway transport as an ecological and mass carrier. The development of multimodal transport is a key factor in increasing the

efficiency of the development of the transport industry in Ukraine in modern conditions, improving the management of supply chains of cargo transport services, but it requires a study of methodology in order to optimize the process of forming multimodal routes and coordinate the actions of all participants in multimodal transport in time.

Key words: *multimodal transportation, methodological analysis, advantages of multimodal transportation, logistics.*

Вступ. Методологія наукового дослідження системи мультимодальних перевезень – це сукупність принципів, засобів, методів і форм організації та проведення наукового пізнання поставленої проблеми у системі мультимодальних перевезень.

Методологія (від грец. *methodos* – спосіб, метод і *logos* – наука, знання) – вчення про правила мислення в процесі створення теорії науки, концептуальний виклад мети, змісту, методів дослідження, які забезпечують отримання максимально об'єктивної, точної, систематизованої інформації про певні процеси та явища [1–3].

Методологія наукового дослідження системи мультимодальних перевезень виконує такі функції:

- дає можливість установити способи одержання наукових знань, що відображають технологічні процеси у системах мультимодальних перевезень;
- визначає шляхи досягнення певної науково-дослідної мети – оптимізувати процес мультимодальних перевезень за часом та вартістю;
- забезпечує всебічність отримання інформації про систему мультимодальних перевезень;
- дає можливість введення нової інформації до фонду теорії науки про транспорт;
- забезпечує уточнення, збагачення, систематизацію термінів і понять у науці на основі всебічного розгляду системи мультимодальних перевезень (у літературі та законодавчій базі країн, що пролягають на мультимодальному маршруті);
- дозволяє створити систему наукової інформації, яка ґрунтується на об'єктивних фактах, і логіко-аналітичній інструментарій наукового пізнання мультимодальних перевезень.

Таким чином, на сьогодні тематика даного дослідження є актуальною.

Постановка проблеми. Важливим елементом вантажних перевезень, зокрема, мультимодальних, є ефективна взаємодія видів транспорту, оптимальний час доставки вантажів до пунктів призначення та залучення мультимодальних маршрутів через українську територію, реалізація інноваційних технологічних рішень у сфері доставки вантажів з метою зниження витрат як мультимодального оператора, так і інших учасників перевізного процесу.

Одними з важливіших чинників розвитку галузі або напрямку господарчої діяльності є дослідження методології певного напрямку діяльності, мультимодальні перевезення не є виключенням. Отже, розвиток та модернізація взаємодії видів транспорту, нарощування транспортних потужностей є необхідною умовою посідання Україною провідного місця на ринку світових логістичних послуг на основі дослідження їх методології.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Науковій проблематиці щодо дослідження методології мультимодальних перевезень присвятили свої наукові

праці такі вчені, як Родріг Ж.-П. [4]; Біеллі М., Бульмакул А. та Мунісіф Х. [5]; Девітт У., Клінгер Дж. [6]; Соколова О.Є. [7] та ін.

Вченими у праці [5] було досліджено поєднання усіх учасників перевезень та видів транспортних систем, що експлуатуються за допомогою різних систем, як мультимодальної транспортної системи. У [7] проаналізовано мультимодальні системи перевезення вантажів, що засновані на внутрішній інтеграції різних видів транспорту та інших учасників перевізного процесу, що взаємодіють між собою, а також виконують свою частину роботи в межах договірних відносин та за наявності єдиного органу керування – «головної ланки». Проте недостатньо висвітленими залишаються окремі питання методології взаємодії видів транспорту і визначень елементів мультимодального перевезення.

Формулювання цілей статті. Ціль статті полягає у формуванні методології наукового дослідження системи мультимодальних перевезень, у дослідженні впливу на ефективність діяльності різних видів транспорту, у тому числі й залізничного, наукового пізнання, у формуванні пропозицій щодо удосконалення діяльності різних видів транспорту та ефективного використання інфраструктурних потужностей на мультимодальних маршрутах.

Виклад основного матеріалу. Методологія дослідження системи мультимодальних перевезень наділена таким апаратом [8] (див. рис. 1):

1) принципи організації та проведення наукового дослідження:

– принцип єдності теорії і практики, що є взаємообумовленими: згідно теорії проведено аналіз літературних джерел, наукових досліджень, законодавчої бази і порівняно із практичним досвідом компанії;

– принцип системності, на підставі якого встановлюється, що кожен досліджуваний об'єкт системи мультимодальних перевезень розглядається як єдине ціле і кожне явище у системі мультимодальних перевезень оцінюється у взаємозв'язку з іншими;

– принцип розвитку, що полягає у формуванні наукового знання про мультимодальні перевезення із відображенням суперечностей, кількісних та якісних змін даного об'єкту дослідження;

– принцип об'єктивності, що потребує врахування всіх факторів, які характеризують систему мультимодальних перевезень і усіх процесів, що у ній відбуваються;

– принцип декомпозиції, який ґрунтується на поділі системи мультимодальних перевезень на частини (за видами транспорту, за країнами переміщення, за видами матеріальних потоків тощо), виділення окремих комплексів робіт для створення умов ефективного аналізу та проектування процесів, що досліджуються у системі;

– принцип абстрагування, який полягає у виділенні істотних та упущенні несуттєвих проявів властивостей досліджуваних явищ і процесів під час перевезення матеріальних потоків різними видами транспорту;

2) методи наукового дослідження системи мультимодальних перевезень та способи його проведення;

3) понятійно-категоріальна основа наукового дослідження (актуальність, проблематика, об'єкт, предмет, мета, завдання, наукова новизна, практична значущість).

	принципи організації та проведення наукового дослідження
Методологія дослідження системи мультимодальних перевезень наділена таким апаратом:	методи наукового дослідження системи мультимодальних перевезень та способи його проведення
	понятійно-категоріальна основа наукового дослідження

Рис. 1. Апарат методології дослідження системи мультимодальних перевезень
Джерело: складено авторами на основі [8]

У дослідженні прийнято наступні рівні методологічного аналізу системи мультимодальних перевезень [8] (див. рис. 2):

1) динамічний рівень (інтерпретація результатів наявних наукових вітчизняних і закордонних досліджень, аналіз загальних форм і методів наукового мислення щодо мультимодальності процесів переміщення матеріальних потоків);

2) статичний рівень (принципи, підходи, форми дослідження, які мають загальнонауковий характер та охоплюють показники перевезень вантажів різними видами транспорту);

3) аналітичний рівень (складається з конкретної сукупності методів і принципів дослідження, що застосовуються у транспортній галузі на сьогодні);

4) предметний рівень (дисциплінарна методологія як сукупність методів і принципів дослідження транспортних систем, що використовуються у транспортній галузі);

5) міждисциплінарний рівень (методологія міждисциплінарного комплексного дослідження, що відповідно до логіки наукового пошуку є сферою взаємодії різних наук: логістики, математики, програмування тощо, коли можна отримати результат лише у разі врахування комплексного знання про предмет дослідження).



Рис. 2. Обрані рівні методологічного аналізу системи мультимодальних перевезень

Джерело: складено авторами на основі [8]

Авторами проведено аналіз визначення поняття мультимодальні перевезення в різних джерелах (див. табл. 1).

Таблиця 1

Визначення поняття «мультимодальні перевезення»

№ з/п	Визначення	Джерело	Примітки
1	Мультимодальне перевезення – транспортування вантажів за одним договором, але виконане принаймні двома видами транспорту; перевізник несе відповідальність за все перевезення, навіть якщо це транспортування виконується різними видами транспорту.	[9]	Визначення сформульовано перевізником
2	Мультимодальне перевезення – перевезення вантажів двома або більше видами транспорту на підставі договору мультимодального перевезення, що здійснюється за документом мультимодального перевезення.	[10]	Визначення згідно законодавчого акту
3	Мультимодальні перевезення – це вид транспортування вантажів, який передбачає використання як мінімум двох різних видів транспорту за одним наскрізним договором.	[11]	Визначення сформульовано перевізником
4	Мультимодальні перевезення – це вантажоперевезення, які здійснюються за допомогою декількох видів транспорту в межах одного договору, коли доставити вантаж до місця призначення за допомогою одного виду транспорту неможливо, коли перевезення одним видом транспорту коштує занадто дорого або займає багато часу.	[12]	Визначення сформульовано перевізником на основі практичного досвіду
5	Мультимодальні перевезення – процес доставки вантажу декількома видами транспорту, з використанням перевантажувальних терміналів по одному контракту.	[13]	Визначення сформульовано перевізником
6	Мультимодальні перевезення допомагають грамотно організувати логістику, оскільки забезпечують транспортування вантажу на далекі відстані з використанням декількох видів транспорту.	[14]	Визначення сформульовано перевізником

Мультимодальні перевезення мають ряд переваг (див. табл. 2) у порівнянні із звичайними перевезеннями вантажів різними видами транспорту.

Таблиця 2

Переваги мультимодальних перевезень

№ з/п	Переваги	Джерело
1	– скорочення витрат замовника, адже співпраця з однією компанією в будь-якому випадку обійдеться дешевше, ніж робота з різними / окремими перевізниками; – оптимізація термінів доставки; – гарантія безпеки вантажу, бо компанія-перевізник бере на себе повну відповідальність за збереження вантажу, так обираючи різних перевізників, не можна гарантувати того, що під час передачі вантажу йому не буде завдано шкоди; – робота з одним постачальником послуги перевезення (ймовірно з одним закріпленим за клієнтом менеджером, який контролює весь процес перевезення), що значно спрощує документообіг і дозволяє оперативніше отримувати інформацію про стан і місцезнаходження вантажу.	[11]

Продовження таблиці 2

2	<ul style="list-style-type: none"> – зручний спосіб доставити велику партію вантажу; – можливість здійснити доставку по технології «від дверей до дверей»; – економія часу на складанні договорів з перевізниками та контролі за перевезеннями; – передача відповідальності за збереження вантажу на всьому шляху доставки одному оператору; – допомога логістичного партнера у проходженні митного контролю; – мінімізація видатків. 	[12]
3	<ul style="list-style-type: none"> – оптимальна організація логістичного ланцюга з метою уникання затримок і зниження витрат на перевалку вантажу; – логістична компанія несе повну юридичну та фінансову відповідальність за весь організований мультимодальний маршрут, бо перевезення здійснюються одним перевізником за договором. 	[13]
4	<ul style="list-style-type: none"> – можливість скласти оптимальний маршрут з урахуванням часових проміжків; – можливість супроводу товару; – допомога вантажовласнику в зборі та отриманні документів; – допомога у митному оформленні. 	[14]

Українські компанії перевізники використовують різні схеми мультимодальних маршрутів (див. табл. 3), відповідно на сьогодні в умовах військового стану в Україні реалізація певних схем є не можливою на території країни, але не виключає подібних схем у міжнародному сполученні.

Таблиця 3

Основні схеми мультимодальних перевезень

№ п/п	Схеми мультимодальних перевезень	Джерело
1	<ul style="list-style-type: none"> 1) морські перевезення + автомобільні перевезення; 2) морські перевезення + залізничні перевезення; 3) морські перевезення + залізничні перевезення + автомобільні перевезення; 4) залізничні перевезення + автомобільні перевезення; 5) авіаперевезення + автомобільні перевезення 	[11]
2	авіаперевезення, морські перевезення, автоперевезення, залізничні перевезення у будь-яких комбінаціях	[12]
3	Вантажі доставляють: залізницею; морем; автомобілями; літаками. З більшості країн перевезення здійснюється морським, авіаційним або залізничним транспортом до України, а потім вантаж доставляють на склад замовника за допомогою автомобілів. Однак можливі й інші комбінації. Їх розробка здійснюється з урахуванням географічного розташування країн, рівня розвитку транспортної інфраструктури, бажаних термінів тощо.	[13]

Сприйняття українськими компаніями-перевізниками Закону України «Про мультимодальні перевезення» було не однозначним. Наприклад, виникло питання, що мультимодальні перевезення стосуються контейнерних та контрейлерних перевезень, але це було неправильне судження, бо вони можуть використовуватися до будь-яких вантажів у будь-яких транспортних одиницях [15].

Законом введено поняття мультимодального та комбінованого перевезення вантажів, як різновиду мультимодального, мультимодального терміналу, документа

мультимодального перевезення, оператора та замовника мультимодального перевезення, надано визначення договору мультимодального перевезення, його істотних умов, прав та обов'язків його сторін [16]. Закріплено право учасників мультимодальних перевезень здійснювати перевезення вантажу на підставі укладення єдиного договору (договір мультимодального перевезення) щодо всіх етапів перевезення незалежно від зміни видів транспорту та здійснювати перевезення вантажу за одним перевізним документом (документ мультимодального перевезення), щодо якого сторони досягли згоди, а раніше кожна компанія трактувала визначення єдиного документу по різному і виникали юридичні незручності. Законом передбачено, що під час надання послуги з мультимодального перевезення вантажів відповідальність оператора мультимодального перевезення за вантаж перед замовником послуги охоплює період з моменту прийняття ним вантажу до мультимодального перевезення та до моменту видачі вантажу, що одразу робить прозорим процедуру надання послуги, а для отримання відшкодування за втрачений (пошкоджений) вантаж замовнику послуги не потрібно встановлювати, на якому етапі перевезення сталися пошкодження чи втрата вантажу, або хто із перевізників не виконав зобов'язання щодо вчасної доставки вантажу [15]. Встановлено граничний розмір відповідальності оператора мультимодального перевезення у спеціальних правах запозичення відповідно до чинної міжнародної практики, бо більшість мультимодальних перевезень слідує у міжнародному сполученні. Також передбачено звільнення від плати за проїзд платними автомобільними дорогами загального користування автомобільних транспортних засобів із знімними кузовами, призначених для перевезення вантажів, максимальна допустима вага яких перевищує дванадцять тонн, що здійснюють комбіновані перевезення, тобто чітко вказані обмеження і урегульовані.

Для транспортно-експедиторських компаній вирішено питання щодо процедури оформлення документів. Законом передбачено укладення єдиного договору мультимодального перевезення та здійснення перевезень за єдиним транспортним документом, що звісно спрощує оформлення перевезень, бо до прийняття Закону перевезення оформлювали окремим транспортним документом для кожного виду транспорту.

Для учасників ринку забезпечено захист прав та інтересів суб'єктів господарювання: компаній-перевізників, виробників продукції, власників та операторів транспортної інфраструктури і т. п. Активний розвиток мультимодальних перевезень дає змогу зменшити обсяги використання автомобільного транспорту шляхом переорієнтації значної частини перевезень, які здійснюються автомобільним транспортом (довгі відрізки маршруту перевезення), на використання більш екологічно чистих видів транспорту, що створить передумови для зміцнення та збереження здоров'я населення, зниження рівня забруднення атмосферного повітря і захистить екологію країн, наприклад, на залізничний. Для операторів мультимодальних перевезень компаній-перевізників очікується позитивний середньостроковий вплив при практиці більше року, що дозволить оптимізувати витрати на надання послуг з перевезення вантажів (згідно думки експертів зменшення часу та вартості до 25%), збільшити перевезення в мультимодальних одиницях до 20%, врегулювати питання відповідальності та збереження вантажів (єдиний договір мультимодального перевезення). Власники та оператори мультимодальних

терміналів мають можливість отримати позитивний середньостроковий вплив при практиці надання мультимодальних послуг більше року такий, як розширення мережі мультимодальних терміналів, створення більшої кількості нових терміналів. Розвиток мультимодальних перевезень дає змогу значно збільшити обсяги перевезень вантажів територією України за участю національних транспортних компаній, наприклад, Акціонерного товариства «Українська залізниця», сприяючи підвищенню конкурентоспроможності країни на світовому ринку транспортних послуг, розвитку мережі наявних транспортних коридорів, інтеграції транспортної інфраструктури України у світову транспортну систему.

Закон України «Про мультимодальні перевезення» №1887 набрав чинності з 19.12.2021 р. і дозволяє максимально зручно та вигідно використовувати різні види транспорту для надання послуг з перевезень в межах одного договору [17], таким чином один перевізник (або логістична компанія) може організувати перевезення вантажу з використанням двох або більше видів транспорту за технологією «від дверей до дверей», за одним договором та єдиним транспортним документом як на міждержавному, так і на регіональному рівнях, що зроблено для імплементації положень Директиви Ради ЄС від 07 грудня 1992 року про встановлення спільних правил для окремих видів комбінованих перевезень вантажів між державами-членами. Організація мультимодальних перевезень, відносини між учасниками мультимодального перевезення, а також їх права, обов'язки та відповідальність визначаються договором мультимодального перевезення та іншими договорами, укладеними відповідно до законодавства України [17]. Договір з надання послуги мультимодального перевезення є двостороннім, укладається між замовником перевезення та оператором перевезення. При цьому перевезення передбачатиме застосування двох чи більше видів транспорту для перевезення замовленого вантажу, а організацію такого перевезення та пошук перевізників (у т.ч. укладання з ними договорів) бере на себе оператор. Введено нові терміни для законодавства України такі, як оператор мультимодального перевезення, послуга мультимодального перевезення. Інші учасники мультимодального перевезення, зокрема, інші фактичні перевізники (автомобільний транспорт, залізниця, морські перевезення тощо) або мультимодальні термінали укладатимуть окремі договори вже з оператором, що більш зручно для власника вантажу [18]. Мультимодальні термінали можуть знаходитися на території залізничних станцій, аеропортів, морських та річкових портів і не входять до меж пунктів пропуску (пунктів контролю) через державний кордон України, у них можуть створюватися зони митного контролю для проведення митного контролю та митного оформлення, а під час здійснення міжнародних мультимодальних перевезень – митні склади, склади тимчасового зберігання та вантажні митні комплекси. Організувати мультимодальне перевезення можна і як транзитне перевезення (з врахуванням вимог Закону «Про транзит вантажів»), і як перевезення небезпечних вантажів (з врахуванням положень міжнародних договорів, Закону «Про перевезення небезпечних вантажів» тощо), і як перевезення об'єктів тваринного та рослинного світу (з врахуванням законів «Про захист тварин від жорстокого поводження», «Про рослинний світ», «Про тваринний світ») і т. д. [17].

Договір мультимодального перевезення має містити такі істотні умови, зокрема: предмет договору: оператор мультимодального перевезення зобов'язується за плату і коштом замовника надати послугу мультимодального перевезення, у т. ч. із залученням інших учасників перевезення вантажів до надання послуги мультимодального перевезення; ціна договору – мультимодальні перевезення вантажів можуть здійснюватися за єдиним (наскрізним) тарифом або за договірними цінами; строк дії договору та окремо – строк (термін) виконання договору; вид та найменування вантажу; види транспорту, які будуть використовуватися, та маршрут мультимодального перевезення зі зазначенням мультимодальних терміналів, де здійснюється зміна видів транспорту; пункти відправлення та призначення вантажу; відповідальність сторін за ненадане виконання сторонами умов договору [17].

Комбіноване перевезення вантажів – це мультимодальне перевезення вантажів однією і тією самою транспортною одиницею без перевантаження вантажу при зміні виду транспорту, де більша частина маршруту приходить на морський, річковий або залізничний транспорт, а відрізок маршруту автомобільним транспортом є максимально коротким, транспортна одиниця і вид транспорту – в цьому випадку це різні речі. Договір на умовах комбінованого перевезення вантажів укладається, коли йдеться про: 1) перевезення вантажів вантажним автомобілем, причепом, напівпричепом, з тягачем або без тягача, знімним кузовом або контейнером, що має відповідне маркування згідно з міжнародними стандартами, автомобільними шляхами на початковому та кінцевому відрізках маршруту мультимодального перевезення та залізницею, внутрішніми водними, морськими шляхами за умови, що морська відстань понад 100 кілометрів прямої лінії, на іншому відрізку маршруту мультимодального перевезення, а також якщо: 2) під час комбінованого перевезення вантажів початковим та/або кінцевим відрізком маршруту є перевезення: між точкою завантаження товарів та найближчою відповідною завантажувальною станцією залізниці для початкового відрізка маршруту і між найближчою відповідною розвантажувальною станцією залізниці та пунктом, де товари розвантажуються для кінцевого відрізка маршруту, або у радіусі максимум 150 кілометрів від річкового або морського порту (терміналу) завантаження або розвантаження.

При укладенні договорів міжнародних мультимодальних перевезень платники податків мають право скористатись нульовою ставкою податку на додану вартість, бо відповідно до [17] за нульовою ставкою оподатковуються операції з постачання таких послуг як, зокрема, міжнародні перевезення пасажирів і багажу та вантажів залізничним, автомобільним, морським і річковим та авіаційним транспортом.

Висновки. Розвиток мультимодальних перевезень за участю залізничного транспорту є ключовим чинником підвищення ефективності розвитку транспортної галузі в Україні у сучасних умовах, удосконалення управління ланцюгами постачання послуг перевезень вантажів, але потребує дослідження з метою оптимізації процесу формування мультимодальних маршрутів та узгодження дій усіх учасників мультимодального перевезення у часі.

У роботі наведено апарат методології дослідження системи мультимодальних перевезень у сучасних умовах, обрано рівні методологічного аналізу системи мультимодальних перевезень.

Досліджено поняття мультимодальні перевезення у різних джерелах як транспортних компаній, так і у законодавчій базі.

Наведено різні схеми мультимодальних маршрутів і враховано, що на сьогодні в умовах військового стану в Україні реалізація певних схем є не можливою на території країни, але не виключає подібних схем у міжнародному сполученні.

Проаналізовано законодавчо введене поняття мультимодального та комбінованого перевезення вантажів як різновиду мультимодального, мультимодального терміналу, документа мультимодального перевезення, оператора та замовника мультимодального перевезення, надано визначення договору мультимодального перевезення, його істотних умов, прав та обов'язків його сторін, що значно спрощує юридичну складову документообігу системи мультимодального перевезення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Антонюк В.С., Полонський Л.Г., Аверченков В.І. Методологія наукових досліджень : навчальний посібник. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 276 с.
2. Мокін Б.І., Мокін О.Б. Методологія та організація наукових досліджень : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2014. 180 с.
3. Чмиленко Ф.О., Жук Л.П. Посібник до вивчення дисципліни «Методологія та організація наукових досліджень». Дніпро : РВВ ДНУ, 2014. 48 с.
4. Rodrigue J.-P. The Geography of Transport Systems. 2020. URL: <https://transportgeography.org/contents/chapter5/intermodaltransportation-containerization/multimodal-transport-system/>.
5. Bielli M., Boulmakoul A., Mouncif H. Object modeling and path computation for multimodal travel systems. *European Journal of Operational Research*. 2006. 175(3). Pp. 1705–1730.
6. Dewitt W., Clinger J. Intermodal Freight transportation. 2000. URL: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/millennium/00061.pdf>.
7. Соколова О.Є. Концептуальні засади формування мультимодальної системи перевезення вантажів. *Наукоємні технології*. 2014. № 1. С. 114–118.
8. Юринець В.Є. Методологія наукових досліджень: навчальний посібник. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2011. 178 с.
9. Мультимодальне перевезення. URL: <https://uk.m.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D1%>.
10. Закон України «Про мультимодальні перевезення». Затверджено президентом України В. Зеленським від 17 листопада 2021 р. № 1887-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1887-20#Text>.
11. Rokada Group – експерт в логістичній галузі. URL: <https://rokada-group.com/poslugi/multimodalni-perevezennya>.
12. Good Logistics. Мультимодальні перевезення. URL: <https://goodlogistics.com.ua/uk/multimodalnye-perevozki/>.
13. Мультимодальні перевезення вантажів. Міжнародні мультимодальні вантажоперевезення – ціни, тарифи на контейнерні мультимодальні перевезення. UTEC Logistics. URL: <https://utec.ua/delivery-types/multimodalne-perevezennya>.

14. Мультимодальні перевезення: особливості. Корисно. Слобідський край. URL: <https://www.slk.kh.ua/news/korisno/multimodalni-perevezenna-osoblivosti.html>.
15. Кісел Ю. Новий закон передбачає укладення єдиного договору мультимодального перевезення. URL: <https://www.railinsider.com.ua/yurij-kisyel-novuj-zakon-peredbachaye-ukladannya-yedynogo-dogovoru-multymodalnogo-perevezennya/>.
16. Ломотько Д.В., Примаченко Г.О. Формалізація вантажних мультимодальних перевезень як багатоетапної та багатоцільової транспортної задачі. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків : УкрДУЗТ, 2023. Вип. 203. С. 105–116.
17. Спілка автоматизаторів бізнесу. URL: <https://www.ebskiev.com/>.
18. Укрінформ: Стефанчук підписав закон про мультимодальні перевезення. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3355291-stefancuk-pidpisav-zakon-pro-multimodalni-perevezenna.html>.

REFERENCES

1. Antoniuk V.S., Polonsky L.G., Averchenkov V.I., Malakhov Yu.A. (2015) Methodology of scientific research: teaching manual [Metodolohiia naukovykh doslidzhen: navch. posib.]. K. : NTUU “KPI”. 276 p. [in Ukrainian].
2. Mokin B.I., Mokin O.B. (2014) Methodology and organization of scientific research: study guide [Metodolohiia ta orhanizatsiia naukovykh doslidzhen: navchalnyi posibnyk.]. Vinnytsia: VNTU. 180 p. [in Ukrainian].
3. Chmylenko F.O., Zhuk L.P. (2014) Guide to studying the discipline “Methodology and organization of scientific research” [Posibnyk do vyvchennia dystsypliny “Metodolohiia ta orhanizatsiia naukovykh doslidzhen”]. D. : RVV DNU. 48 p. [in Ukrainian].
4. Rodrigue J.-P. The Geography of Transport Systems. 2020. URL: <https://transportgeography.org/contents/chapter5/intermodaltransportation-containerization/multimodal-transport-system/>.
5. Bielli M., Boulmakoul A., Mouncif H. Object modeling and path computation for multimodal travel systems. *European Journal of Operational Research*. 2006. 175 (3). Pp. 1705–1730.
6. Dewitt W., Clinger J. Intermodal Freight transportation. 2000. URL: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/millennium/00061.pdf>.
7. Sokolova O. E. (2014) Conceptual foundations of the formation of a multimodal cargo transportation system [Kontseptualni zasady formuvannia multymodalnoi systemy perevezennia vantazhiv]. *Scientific technologies*. № 1. P. 114–118 [in Ukrainian].
8. Yurinets V.E. (2011) Methodology of scientific research: study guide [Metodolohiia naukovykh doslidzhen: navchalnyi posibnyk]. Lviv : LNU named after Ivan Franko. 178 p. [in Ukrainian].
9. Multimodal transportation [Multymodalne perevezennia]. URL: <https://uk.m.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D1%> [in Ukrainian].

10. Law of Ukraine "About Multimodal Transportation" [Zakon Ukrainy «Pro multymodalni perevezennia»]. Approved by the President of Ukraine V. Zelenskyi on November 17, 2021 № 1887-IX URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1887-20#Text> [in Ukrainian].
11. Rokada Group is an expert in the logistics industry [Rokada Group – ekspert v lohistychnii haluzi]. URL: <https://rokada-group.com/poslugi/multimodalni-perevezennya> [in Ukrainian].
12. Good Logistics. Multimodal transportation [Good Logistics. Multymodalni perevezennia]. URL: <https://goodlogistics.com.ua/uk/multimodalnye-perevozki/> [in Ukrainian].
13. Multimodal cargo transportation. International multimodal cargo transportation – prices, tariffs for container multimodal transportation. UTEC Logistics. [Multymodalni perevezennia vantazhiv. Mizhnarodni multymodalni vantazhoperevezennia – tsiny, taryfy na konteinerni multymodalni perevezennia. UTEC Logistics.] URL: <https://utec.ua/delivery-types/multimodalne-perevezennya> [in Ukrainian].
14. Multimodal transportation: features. Useful. Slobid region [Multymodalni perevezennia: osoblyvosti. Korysno. Slobidskyi kraj] URL: <https://www.slk.kh.ua/news/korysno/multimodalni-perevezennia-osoblyvosti.html> [in Ukrainian].
15. Kisel Y. The new law provides for the conclusion of a single contract of multimodal transportation [Novyi zakon peredbachaye ukladennia yedynoho dohovoru multymodalnoho perevezennia] URL: <https://www.railinsider.com.ua/yurij-kisyel-novyj-zakon-peredbachaye-ukladannya-yedynogo-dogovoru-multymodalnogo-perevezennya/> [in Ukrainian].
16. Lomotko D. V., Prymachenko H. O. Formalization of cargo multimodal transportation as a multi-stage and multi-purpose transport task [Formalizatsiia vantazhnykh multymodalnykh perevezenn yak bahatoetapnoi ta bahatotsilovoi transportnoi zadachi] *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*. Kh.: UkrDUZT, 2023. Issue 203. P. 105–116 [in Ukrainian].
17. Union of business automatizers [Spilka avtomatyzatoriv biznesu]. URL: <https://www.ebskiev.com/> [in Ukrainian].
18. Ukrinform: Stefanchuk signed the law on multimodal transportation [Ukrinform: Stefanchuk pidpysav zakon pro multymodalni perevezennia] URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3355291-stefanchuk-pidpisav-zakon-pro-multimodalni-perevezennia.html> [in Ukrainian].

НОТАТКИ

Наукове видання

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

Випуск 3(18), 2023

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. 19,6.
Замов. № 0923/603. 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 3(18), 2023

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 19,6.
Order No 0923/603. 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