

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

ВИПУСК 1(24), 2025

Заснований у жовтні 2016 року



Видавничий дім
«Гельветика»
2025

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

№ 1(24)
2025

Заснований у жовтні 2016 року

Виходить 4 рази на рік

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

На підставі Наказу Міністерства освіти і науки України № 1188 від 24.09.2020 р.
(додаток 5) журнал внесений до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») 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 – д.е.н., проф. *Савельєва І.В.*
Відповідальний секретар – д.т.н., доц. *Мінчев Д.С.*

Члени редакційної колегії:

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

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

Рекомендовано до друку Вченою радою
Одеського національного морського університету
(протокол № 8 від 26.03.2025 р.)

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

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

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

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

ODESSA
NATIONAL MARITIME UNIVERSITY

TRANSPORT DEVELOPMENT

Scientific journal

ISSUE 1(24), 2025

Founded in October 2016



Publishing House
"Helvetica"
2025

ODESSA
NATIONAL MARITIME UNIVERSITY
TRANSPORT DEVELOPMENT
SCIENTIFIC JOURNAL

№ 1(24)
2025

Founded in October 2016

Frequency: four times a year

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

Pursuant to the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 1188
dated 24.09.2020 (Appendix 5), the journal is included in the List of scientific professional publications
of Ukraine (category “B”) 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: DSc, Professor *Savelieva I.V.*
Executive Secretary: DSc, Associate Professor *Minchev D.S.*

Editorial Board Members:

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

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

Recommended for printing by the Academic Council of Odessa National Maritime University
(Minutes No 8 dated March 26, 2025)

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

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

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

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

З М І С Т

ЕКОНОМІКА

V.V. Zhykharieva, N.T. Ksandinov
Current investment trends in the port industry.....7

МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

Г.В. Кузнецов, Ю.М. Харитонов
Ефективність використання теплоакumuлюючих систем у складі енергетичних установок суден різного призначення.....20

В.Ю. Кучеренко, М.П. Булгаков
Сучасні методи та напрямки досліджень по зниженню рівня гідроакустичних шумів судна.....31

О.В. Semenov, S.A. Karianskyi
Analysis of Modern Methods for Ensuring Lubrication of The Cylinder-Piston Group.44

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

О.Ф. Кузькін, І.М. Райда, Е.В. Терешенко
Статистичний аналіз мереж контактів пасажирів громадського транспорту в контексті ризику розповсюдження інфекційних захворювань59

І.М. Ларіна
Оцінка ризику порушення сталого функціонування техніко-технологічної системи морського контейнерного терміналу.....73

В.І. Літвяк, О.В. Щербина
Контейнерні перевезення поромним сполученням у Чорному морі як частина Транскаспійського міжнародного транспортного маршруту.....89

О.О. Sapronov, V.L. Demchenko, V.D. Sharanov, A.V. Sapronova
Improvement of the characteristics of protective coatings intended for the protection of surfaces of aids navigation water transport.....100

О.О. Холодова, М.О. Бугайова
Обґрунтування необхідності впровадження діагональних пішохідних переходів на перехрестях м. Харків.....114

C O N T E N T S

ECONOMY

V.V. Zhykharieva, N.T. Ksandinov
Current investment trends in the port industry7

SEA AND INLAND WATER TRANSPORT

H.V. Kuznetsov, Yu.M. Kharytonov
Efficiency of using thermal energy storage systems as part of marine power plants
for vessels of various purposes.....20

V.Y. Kucherenko, M.P. Bulgakov
Innovative methods and research directions for reducing ship hydroacoustic noise....31

O.V. Semenov, S.A. Karianskyi
Analysis of modern methods for ensuring lubrication of the cylinder-piston group.44

TRANSPORT TECHNOLOGIES (BY TYPE)

O. F. Kuzkin, I. M. Raida, E.V. Tereshchenko
Statistical analysis of public transport passengers' encounter networks
in the context of the risk of the infectious disease spread.....59

I.M. Larina
Risk assessment of marine container terminal technological system sustainable
functioning disturbance73

V.I. Litviak, O.V. Shcherbyna
Container transportation by ferry in the Black Sea as part
of the Trans-Caspian international transport route.....89

O.O. Sapronov, V.L. Demchenko, V.D. Sharanov, A.V. Sapronova
Improvement of the characteristics of protective coatings intended
for the protection of surfaces of aids navigation water transport.....100

O.O. Kholodova, M.O. Buhaiova
Justification of the need to introduce diagonal pedestrian crossings
at the intersections of Kharkiv.....114

EKOHOMIKA

UDC 33.02:656.71.4

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2025.1-24.01>

CURRENT INVESTMENT TRENDS IN THE PORT INDUSTRY

V.V. Zhykharieva¹, N.T. Ksandinov²

¹D.Sc. (Economics), Professor, Head of the Department of Economics and Finance,
Odesa National Maritime University,
Odesa, Ukraine,

ORCID ID: 0000-0002-2179-8483

²Postgraduate of the Economics and Finance Department,
Odesa National Maritime University,
Odesa, Ukraine,

ORCID ID: 0000-0002-1844-4836

Summary

Introduction. The tasks of sustainable development of the port industry, which cannot be solved without investing in port infrastructure, determine the relevance of the research of investment trends in the industry. To define the need for investments, economic justification of investment directions and sources of investment financing, it is necessary to study the main factors that affect investment activity in the port industry, and to determine current trends in this field. **Purpose.** The purpose of the article is to determine investment trends in the port industry at the current stage of its development. **Results.** The main economic and technological drivers of the investment activity in the port industry in the context of sustainable development have been systematized. Assessment of the dynamics of the gross volume of cargo handled in the ports and the directions of investment in the port infrastructure by cargo segments was carried out. The main trends in the development of investment in the port infrastructure were defined. **Conclusions.** The main trends in the development of investment in the port infrastructure include: changes in the geographic structure of investments due to the increase in the volume of maritime trade and cargo handled in the seaports of the countries of Southeast Asia and the Middle East; changes in the structure of investments by cargo segments due to the slowdown in the development of container trade and the higher growth rates of bulk dry cargo transportation; increased need for investment in the port infrastructure to eliminate technological constraints associated with increasing size and complexity of sea vessels; changes in the directions of investments for energy transition and sustainable development, intensification of the impact on investment activity of technological changes – digital transformation in seaports and greening of supply chains; change in the orientation of investment activity to the concept for the sustainable development of port companies, which often involves projects with high social value; investments in the industry contribute to the transformation of seaports from multimodal centers to centers of innovation and sustainable development;

investments lead to an increase in the role of seaports as an important component of the geopolitical and economic stability of countries and regions; the need for investment in new port areas outside urban areas due to the impact of coastal urbanization on port development.

Key words: *investment, port industry, infrastructure, water transport, seaborne trade, shipping, strategic development, energy efficiency, digital transformation, ecologization.*

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ІНВЕСТИВАННЯ В ПОРТОВІЙ ГАЛУЗІ

В.В. Жихарєва¹, Н.Т. Ксандінов²

¹д.е.н., професор, завідувач кафедри «Економіка і фінанси»,
Одеський національний морський університет,
Одеса, Україна,

ORCID ID: 0000-0002-2179-8483

²аспірант кафедри економіки і фінансів,
Одеський національний морський університет,
Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-1844-4836

Анотація

Вступ. Актуальність теми дослідження обумовлена завданнями сталого розвитку портової галузі, які неможливо реалізувати без інвестування у портову інфраструктуру. Для визначення потреби в інвестиціях, економічного обґрунтування напрямів інвестування і джерел фінансування інвестицій необхідно вивчення основних факторів, які впливають на інвестиційну діяльність у портовій галузі, і аналіз сучасних тенденцій у цій сфері. **Мета.** Стаття присвячена визначенню тенденцій інвестування у портовій галузі на сучасному етапі її розвитку. **Результати.** Систематизовано основні економічні та технологічні драйвери інвестиційної діяльності портової галузі в контексті сталого розвитку. Проведено оцінку динаміки обсягів перевалки вантажів у портах та напрямів інвестування розвитку портової інфраструктури за вантажними сегментами. Визначено головні тенденції інвестування в портову інфраструктуру. **Висновки.** До тенденцій інвестування у розвиток портової інфраструктури віднесено: зміни географічної структури інвестицій у зв'язку зі збільшенням обсягів морської торгівлі та перевалки вантажів у морських портах країн Південно-Східної Азії та Близького Сходу; зміни структури інвестицій за вантажними сегментами через уповільнення темпів зростання контейнерної торгівлі та більш високі темпи зростання перевезень сухих масових вантажів; збільшення потреби в інвестиціях у портову інфраструктуру для усунення технологічних обмежень, пов'язаних зі збільшенням розміру та складності морських суден; зміни напрямів інвестицій для енергетичного переходу та сталого розвитку, посилення впливу на інвестиційну діяльність технологічних змін – цифрової трансформації в морських портах і екологізації ланцюгів постачання; зміна орієнтації інвестиційної діяльності на концепцію сталого розвитку портових компаній, яка часто передбачає проекти з високою соціальною цінністю; інвестиції в галузь сприяють перетворенню морських портів із мультимодальних центрів у центри інновацій та сталого

розвитку; інвестиції приводять до підвищення ролі морських портів як важливого компонента геополітичної та економічної стабільності країн і регіонів; потреба в інвестиціях у нові портові території за межами міських територій через вплив прибережної урбанізації на розвиток портів.

***Ключові слова:** інвестиції, портова галузь, інфраструктура, водний транспорт, морська торгівля, судноплавство, стратегічний розвиток, енергоефективність, цифрова трансформація, екологізація.*

Introduction. Seaports in the 21st century face a number of new factors that significantly affect the development strategy and investment activities in the industry. The global goals of sustainable development until 2030, proclaimed by the UN Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015 № 70/1 [1], include the promotion of progressive, inclusive and sustainable economic growth, full and productive employment and decent work for all; creation of sustainable infrastructure, promotion of industrialization and innovation; taking measures to combat climate change and its consequences; preservation and rational use of oceans, seas and marine resources. The specified goals are correlated with the concept of ensuring the sustainable development of port companies.

Taking into account that the study of trends is based on statistical data, the research used the method of comparison for analysis of international maritime trade by cargo type; methods of descriptive statistics, including correlation and regression analysis for study of relationship between world GDP and the volume of containers handling in seaports based on the polynomial regression model; as well as the logical-analytical method and analysis-synthesis of results for identifying and systematization the main drivers of the investment activity in the port industry.

Formulation of the problem. The strategic development of seaports is impossible without investments in various components of the port infrastructure. Therefore, identifying the main drivers and trends in the development of investment in the port industry is a current task.

Analysis of recent research and publications. In the article by B. Purvis, Y. Mao & D. Robinson [2] a study of the genesis of the concept of sustainability, consisting of three pillars (environmental, economic and social), was carried out. It is shown that there is no unified view of the status quo of these components, and their theoretically accurate description. The reason is the nature of the sustainability discourse, which has historically emerged from very different schools of economic thought. The lack of such a thorough concept destroys approaches to theoretically strict operationalization of sustainability. Increased attention and pressure from investors, regulators, employees and other stakeholders of maritime transport companies make environmental, economic and social factors important drivers of their development, and require the generalization of existing practices and the working-out of appropriate methodological approaches.

Criteria for the development of maritime transport companies include environmental, social and governance (ESG) criteria for assessing business. In [3] it is shown that there is a growing interest and pressure from investors, regulators and politicians to make ESG an important issue. The promotion of the ESG concept for the development of maritime companies is becoming increasingly widespread in all areas of business and government

activity. The paper by P. Matos [4] has developed ESG criteria to the fields of sustainable development. Investments that comply with ESG are growing in the total volume in the capital markets. The growing interest of investors in ESG reflects the view that issues of ecology, social responsibility and corporate governance, including risks and opportunities, can affect the long-term performance of companies and, therefore, should be adequately taken into account when making investment decisions.

The work by T. Notteboom, A. Pallis & J.-P. Rodrigue [5] shows that the implementation and directions of investment in the port industry depend on economic and technological changes, in particular, the digital transformation of the industry and the greening of supply chains in recent years. The characteristics of the demand for port terminal services determine the requirements for their design in terms of sea access conditions, quay walls, and terminal equipment. In the article by N.V. Smetyna [6] summarizes the approaches to defining the concept of a smart port, which uses innovative digital technologies to increase the efficiency, the level of security of operations and protection. It is determined that the cumulative average annual growth rate of the global smart ports market will reach 25% by 2032.

In the paper by V. Zhykharyeva, N. Primachev, T. Frasinuk [7] features of transformation processes in the global seaborne trade is considered. All subsystems that form cargo flows are interested in the stable operations of maritime transport, which provides up to 80% of foreign trade.

Analysis of existing research makes it possible to summarize that infrastructure development is one of the most important priorities for the development of investment activities in the port industry. High capital intensity and rapid technological development of the port industry make it necessary to study the factors influencing investment in port infrastructure and identify the main investment trends, connection between investment aspects and directions of sustainable development of port companies, taking into account industry specifics, in particular, those aimed at greening and digitalization the activities of seaports.

Formulation of the goals of the article. The goals of the paper are to systemize the main economic and technological drivers of the investment activity in the port industry in the context of sustainable development, in particular, to assess of the dynamics of the volume of cargo handled in sea ports, the directions of investment in the port infrastructure by cargo segments, and to define the main trends in the development of investment in the port industry.

Presentation of the main research material. The main factor influencing the need to expand the production capacity of seaports and terminals is the demand for cargo handling services by port companies, which depends on the dynamics of international seaborne trade.

The volume of international maritime trade depends on the world GDP. In 2023, the maritime trade increased by 2.4%, the global GDP – by 2.7%. In 2021 and 2022, on the contrary, the GDP growth rate decreased significantly more than the maritime trade growth rate [8]. The ratio of the volume of international maritime trade to world GDP has been decreasing since 2010. The growth rate of this ratio has been increasing relatively slower than GDP, in particular, since 2018, when the USA imposed tariffs on exports from China.

Total volume of transportation reached 62,037 billion ton-miles in 2023, a 4.2% increase over 2022, driven by longer voyages across all segments, driven by supply disruptions due to the war in Ukraine, disruptions in the Red Sea, and a decrease in the water level in the Panama Canal, which led to longer voyages of ships and increased distances [8]. Dry cargo transportation is less prone to disruptions in the Red Sea and the Suez Canal. The disruptions have particularly affected exports of grain from the US and other dry bulk cargoes from the North Atlantic to Asia. Trade in iron ore and deliveries of steel products were also disrupted due to changes in routes and increased transit times.

Figure 1 shows the growth rates of international maritime trade by cargo segments in 2023.

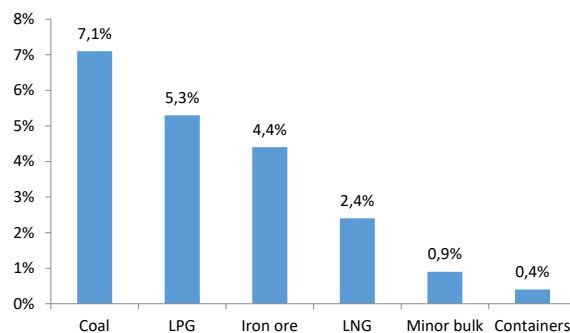


Fig. 1. Growth rates of international maritime trade by cargo type in 2023, % [8]

The growth rate of coal transportation (7.1%) was affected by the global energy crisis and geopolitical tensions, particularly in Europe, increasing dependence on coal as an alternative energy source, which increased demand and trade volume [8]. Growth in iron ore shipments (4.4%) was driven by strong demand from the metallurgical sector, especially in China and other rapidly developing countries [8]. The growth rate of transportation of minor bulks (0.9%), which does not include forest cargo and metal products, was affected by a slowdown in construction and manufacturing activity in key markets, combined with logistical problems [8].

The growth rate of liquefied petroleum gas (LPG) transportation (5.3%) was influenced by high demand for clean energy sources and growing industrial activity in Asia and other developing regions [8]. The growth rate of LNG transportation (2.4%) was influenced by weaker market conditions compared to recent years, due to softer gas markets and fleet growth [8].

Global economic uncertainty, disruptions in supply chains and reduced consumer spending on goods affected the growth rate of containerized cargo transportation – 0.4% in tons and -0.14% in twenty feet equivalent units (TEU) [8]. Improvements in economic prospects and changes in shipping routes from the Red Sea are factors that have supported a high level of container trade in 2024. This followed a decline in volumes in 2022 and low growth in container trade in 2023.

Figure 2 shows the annual growth rates of world real GDP and the volume of container handled in TEU in seaports around the world.

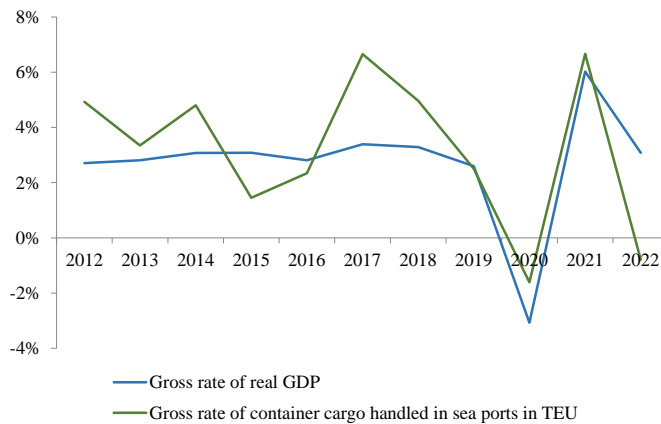


Fig. 2. Annual growth rates of world real GDP and the volume of containerized cargo handled in seaports around the world, determined using [9, 10], %

Table 1 shows descriptive statistics for annual growth rates of world real GDP and the volume of containerized cargo handled in seaports, calculated by authors.

Table 1

Descriptive statistics for annual growth rates of world real GDP and container cargo handled in seaports

Indicators	Growth rate of world real GDP	Growth rate of container cargo handled in seaports
Average	0.027	0.030
Standard Error	0.007	0.009
Median	0.031	0.029
Standard Deviation	0.023	0.028
Sample Variance	0.001	0.001
Kurtosis	6.157	-0.814
Skew	-1.896	-0.315
Interval	0.091	0.083
Minimum	-0.031	-0.016
Maximum	0.060	0.067
Level of reliability	0.271	0.303

Figure 3 shows the results of correlation and regression analysis of the relationship between the world real GDP and the volume of containers handled in seaports around the world based on the data presented in Figure 2.

The linear correlation coefficient of annual growth rates in percent for 2012–2022 was 0.70, the correlation of the world real GDP in USD and container handling in seaports for 2011–2022 was 0.99, indicating a very close positive correlation. The coefficients of determination indicate that the calculated parameters of the polynomial model explain the dependence between the annual growth rates by 49%, and between absolute values of the parameters – by 98% which indicates the high quality of the model.

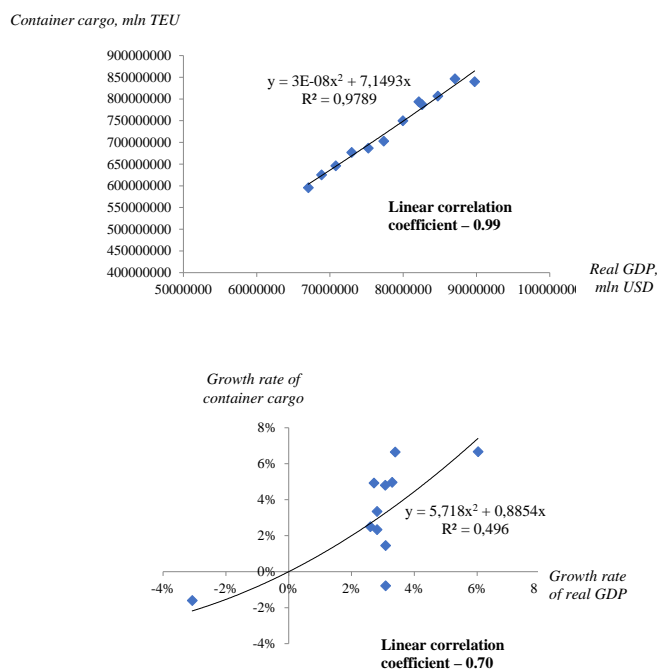


Fig. 3. Correlation and regression analysis the relationship between world real GDP and the volume of containers handled in seaports in terms of absolute values and growth rates (polynomial regression model)

Figure 4 shows the 10 largest container ports in the world as of 2023.

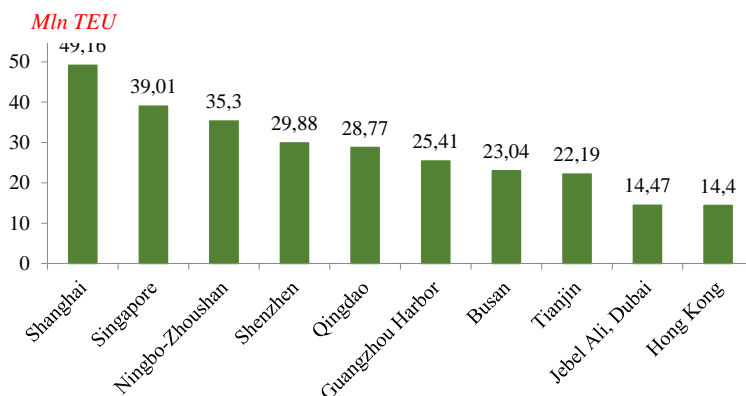


Fig. 4. Top 10 largest container ports in the world in 2023, million TEU [11]

As can be seen from the data, the only European port of Rotterdam, which was in the top 10 world largest ports, with a volume of 13.45 million TEU in 2023, gives position to the ports Jebel Ali, Dubai (9th place) and Hong Kong (10th place) [11]. Therefore, the dynamics of the port industry reflects the rapid development of the countries of Southeast Asia and the Middle East, in particular, China, South Korea, and the United

Arab Emirates, which affects the volume of maritime trade and the volume of cargo flows in seaports.

The cargo flow of Chinese ports grew at the highest rates from 2019 to 2023, in particular, Qingdao by 36.9%, Ningbo-Zhoushan by 28.4%, and Tianjin by 28.3% [11]. The cargo flows in Rotterdam, on the contrary, decreased by 9.2% to the level of 2019 [11].

Figure 5 shows the largest cargo ports in Europe, among which in 2023 the first place was taken by port of Rotterdam with a volume of 438.8 million tons [12].

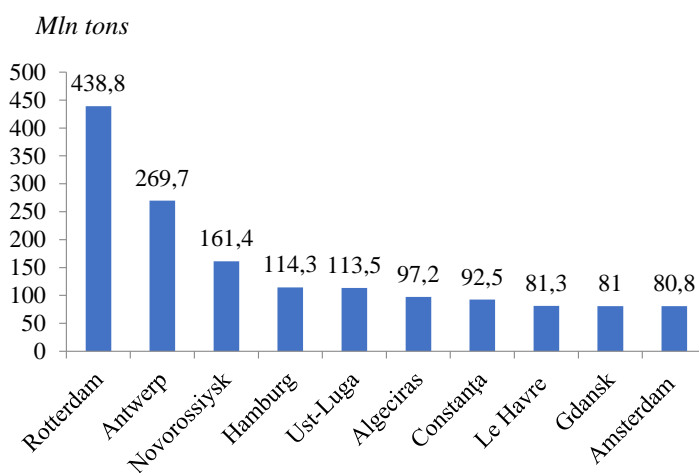


Fig. 5. Top 10 largest ports in Europe in 2023, million tons [12]

Figure 6 shows the dynamics of the gross volume of cargo transshipped in the seaports of the European Union and the trend line (linear filtering).

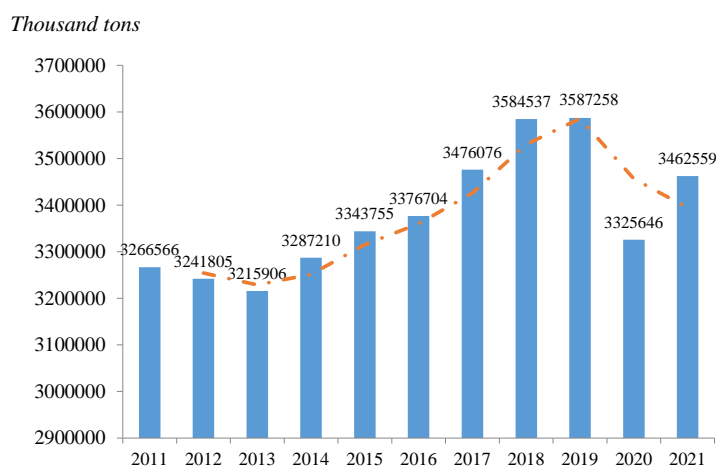


Fig. 6. Gross volume of cargo handled in seaports of the EU from 2011 to 2021, thousand tons [13]

As can be seen from the data in Figure 6, cargo volume increased from 2013 to 2019, but in 2020 there was a significant decrease (7%) to the level of 2019, in 2021 – a recovery (4%) to the level of 2020.

In EU countries, infrastructure development is one of the main directions of port investment, as well as ensuring a good business climate, proper governance and the development of intermodality [14]. The study of European Sea Ports Organization (ESPO) examines the investment landscape and challenges facing European ports, shedding light on their changing role and urgent needs [15]. The research is a comprehensive analysis based on data from 84 port authorities in European Union that shows a staggering 80 billion euro investment need over the next decade, highlighting the critical role of seaports in economic and environmental development [15].

Ports in the European Union are no longer just gateways; they are turning into centers of innovation, sustainable development and sustainability. The share of investments related to the transition to clean energy and the transition of ports and shipping to sustainable development has increased. While this category was less than 10% in 2018, its share will grow to nearly 25% in 2023 [15]. A closer look at the different types of investments in this category shows that a large share involves investments in "infrastructure and related services and the energy transition of the economy" (55 projects in total), another large share consists of investments in "infrastructure and facilities to reduce the environmental footprint of shipping (54 projects), while a smaller share concerns "investments in reducing the environmental footprint of port operations" (8 projects) [15].

The increase in investment in projects that contribute to the energy transition and sustainability is linked to a change in the services provided by EU port authorities. Almost two-thirds of all port authorities plan to start offering shore power for vessels and barges, while the rest (with a few exceptions) already provide such services [15]. Port authorities also aim to provide other services such as truck chargers, green energy supply for port companies, clean fuel for vessels and barges, pipeline services for the transportation of liquefied gases, and digital energy management. In terms of clean energy and decarbonization, the most common investment project is the power supply of ships.

More than 70% of all ports that provided data on their investment projects plan to invest in the power supply of vessels, about half of all port authorities plan to invest in means for transporting and/or storing electricity, about a third of ports plan to invest in renewable energy production and about 30% of them plan to invest in energy management systems [15]. The investment category "Expansion of port basins, berths and terminal sites" remains the largest of 123 projects [15].

According to the Trans-European Transport Network (TEN-T) project developed by the EU, European ports are classified as core ports and comprehensive ports [16]. The TEN-T Regulation establishes a set of quantitative thresholds to determine which seaports are core ports. Thresholds are set for both cargo volumes and passenger numbers [17]. Table 2 shows the maritime transportation segments for which investments in the expansion of core and comprehensive ports have been made.

The data show that while the container segment remains the most important for EU ports expansion (35% for key ports and 15% for comprehensive ports), reflecting the development of container trade, general cargo also plays an important role (30% for

Table 2

**Segments of maritime transportation for which investments were made
in the expansion of seaports of the EU countries in 2018–2023 [15]**

Categories of seaports	Containers	Ro-Ro cargo	Passenger (ferries)	Cruise	Dry bulk	Liquid bulk	Breakbulk and general cargo
Core	35%	32%	11%	10%	26%	14%	30%
Comprehensive	15%	24%	12%	0%	30%	15%	45%

core ports and 45% for comprehensive ports), as well as bulk dry cargo (26% for core ports and 30% for comprehensive ports). Investment needs of seaports of EU countries amount to 80 billion euros for the next 10 years (until 2034) [15]. Investments in sustainable development and energy transition are becoming the second most important investment category for port authorities. Ports need access to sufficient public funding. They should be able to use the various financing instruments that should be available to contribute to the achievement of the established strategic goals. It is necessary to maintain a stable and attractive investment climate and make sure that investors will continue to invest in seaports of EU. The majority of projects involve the amount of investments from 20 to 50 million euros, in the second place – projects up to 10 million euros, and in the third place – from 50 to 100 million euros [15].

The increase in the size and complexity of the fleet, in particular ultra-large container vessels (ULCV), new types of Ro-Ro ships, tankers and gas carriers, affects the increase in the need for investments in the construction of berths, dredging, acquisition of loading equipment, expansion of storage capacities, etc. The technical requirements of some new classes of vessels, taking into account their size and design, affect medium-sized ports, which may need to overcome restrictions to handle these ships in terms of berth length, depth at berths, or lack of an adapted power supply system. These limitations can only be overcome by investing in port infrastructure.

The role of seaports as an important component of geopolitical and geoeconomic stability is increasing. Ports increase strategic effort, which help strengthen the country's control over important maritime and energy routes, and contribute to the strengthening of bilateral and multilateral relations. Ports improve connections between countries and regions, and facilitate trade and country participation in the global value chain through the integration of procurement, production and distribution systems, open opportunities for transactions in local currency, leading to its internationalization.

Most ports are located in or near cities that leads to pressure on the transformation of the port area into an urban space, and the development of new port facilities outside the urban areas. Therefore, the urbanization of the coastal zone is a driver of investments in new port areas. The paper by D. Pavlenko [18] examines the trend of increasing attention to the spatial strategy of port infrastructure development. The increasing complexity of port operations leads to diversification and intensification of land use, which requires finding new interactions between the port and the city. For example, the port of Amsterdam, the second largest port in the Netherlands, is facing strong pressure from urban growth. Management is looking for strategies to maximize the value of the port for both the community and the business [18]. In the future, those ports that increase their spatial

productivity will be successful. Other ports will lose their meaning of existence and will be absorbed by cities. Future ports will create ecosystems based on synergies between existing clusters in both the city and the port. Seaports will become even greater drivers of innovation and income for cities and improve employment in port cities.

Conclusions. The following main trends in the development of investment in the port infrastructure were highlighted.

- Changes in the geographic structure of investments due to the constant increase in the volume of maritime trade and cargo volume handled in the seaports in the Southeast Asia and the Middle East, in particular, China, South Korea, and the United Arab Emirates, by reason of their rapid economic development and continued containerization of sea transportation.

- Changes in the structure of investments by cargo segments due to the slowdown in the development of container trade and the higher growth rates of dry bulk cargo transportation.

- Increased need for investment in port infrastructure to eliminate technological constraints associated with increasing fleet size and complexity.

- Changing the directions of investments in port infrastructure for energy transition and sustainable development, intensification of the impact on investment activity of technological changes, in particular, digital transformation in the port industry, greening of supply chains, and the related increase in investment volumes.

- Change in the orientation of investment activity to the ESG concept for the sustainable development of port companies, which often involves investment projects with high social value, but slow or low return on investment and a high level of risk, and for some types of investment only environmental and/or social effect.

- Investments in port infrastructure contribute to the transformation of seaports from multimodal centers to centers of innovation and sustainable development – clean energy, industrial clusters and circular economy.

- Investments in port infrastructure lead to an increase in the role of seaports as an important component of the geopolitical and economic stability of countries and regions.

- The need for investment in new port areas outside urban areas due to the impact of coastal urbanization on port development.

The practical value of the research is the possibility of using the identified trends for further justification of investments in the port infrastructure and forecasting the need for capital investments. In particular, in the process of planning the post-war reconstruction and strategic development of Ukrainian seaports of Black Sea & Danube Region, it is advisable to take into consideration the experience of investing in the infrastructure of ports and sea terminals in Southeast Asia and the Middle East, to pay attention to structural changes in investing in port capacities by type of cargo, to take into account the increase in the size and other characteristics of sea vessels and technological limitations in Ukrainian seaports, to follow the global trend of investing in innovative projects for the greening of port activities, increasing energy efficiency, as well as projects with high social value. The implementation of these measures will allow not only increase the efficiency of the port system of Ukraine, but also the geopolitical and economic stability of regions and the country as a whole.

Prospective areas for further research include a more detailed study of the experience of investing in the infrastructure of the fastest growing seaports, classification of investment objects in the port industry and various sources of investment financing.

BIBLIOGRAPHY

1. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development: Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015 № 70/1. United Nations, 2015. URL: <http://surl.li/xsopxu>.
2. Purvis B., Mao Y., Robinson D. Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins. *Sustain Sci*. 2019. 14. P. 681–695.
3. Zhykharieva V.V., Yastrebnyi V.M. Environmental criteria for sustainable development in strategic management of sea transport companies. *Transport development*. 2024. 3. P. 20-29.
4. Matos P. ESG and responsible institutional investing around the world: A critical review. CFA Institute Foundation, 2022. 88 p.
5. Notteboom T., Pallis A., Rodrigue J.-P. Port Economics, Management and Policy. New York: Routledge, 2022. 690 p.
6. Smetyna N. Digital technologies in ensuring the efficiency of maritime transportation: use in the activities of smart ports. *Development of management and entrepreneurship methods on transport*. 2024. 3 (88). P. 7-22.
7. Zhykharyeva V., Primachev N., Frasinuk T. Features of transformation processes in the global maritime trade market. *Economic journal of Odessa polytechnic university*. 2023. 4(26). P. 91-98.
8. Review of maritime transport. UNCTAD, 2024. URL: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2024_en.pdf.
9. Container port traffic 2020-2022. World Bank Group. 2023. URL: <http://surl.li/cpcdvvy>.
10. Global GDP. 2024. URL: <https://www.worldometers.info/gdp/#gdpyear>.
11. The Top 50 Container Ports. World Shipping Council. 2024. URL: <https://www.worldshipping.org/top-50-ports>.
12. The Largest Ports in Europe. ShipHub. 2024. URL: <https://www.shiphub.co/the-largest-ports-in-europe/>.
13. Gross weight of seaborne goods handled at ports in the European Union (EU-27) from 2011 to 2021. 2022. URL: <https://surl.li/ayheqf>.
14. Priorities investments in ports. 2024. URL: <https://www.feport.eu/media-corner-2/investments-in-ports>.
15. The investment pipeline and challenges of European ports: Port investments study 2024. 13. Brussels: European Sea Ports Organization. 2024. 27 p.
16. List of Sea Ports in the Core and Comprehensive Networks: European Commission, 2014. URL: <https://surl.li/gbjkz>.
17. Position of the European Sea Ports Organization on the Regulation 1315/2013 on Union guidelines for the development of the Trans-European Transport network. ESPO, 2019. 11 p.
18. Pavlenko D. Global and national port trends 2030: Infrastructure Talks with experts. Deloitte, 2020. URL: <https://surl.li/gszyppo>.

REFERENCES

1. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development: Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015 № 70/1 (2015). United Nations. Retrieved from <http://surl.li/xsopxu>.
2. Purvis, B., Mao Y., Robinson, D. (2019). Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins. *Sustain Sci*, 14, 681–695.
3. Zhykharieva, V.V., Yastrebnyi, V.M. (2024). Environmental criteria for sustainable development in strategic management of sea transport companies. *Transport development*, №3, 20-29.
4. Matos, P. ESG and responsible institutional investing around the world: A critical review (2020). CFA Institute Foundation, 88 p.
5. Notteboom, T., Pallis, A., Rodrigue, J.-P. (2022). *Port Economics, Management and Policy*, New York: Routledge, 690 p.
6. Smetyna N. (2024). Digital technologies in ensuring the efficiency of maritime transportation: use in the activities of smart ports. *Development of management and entrepreneurship methods on transport*, 2024, 3 (88), 7-22.
7. Zhykharyeva, V., Primachev, N., Frasinuk, T. (2023). Features of transformation processes in the global maritime trade market. *Economic journal Odessa polytechnic university*, 4 (26), 91-98.
8. Review of maritime transport (2024). UNCTAD. Retrieved from https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2024_en.pdf.
9. Container port traffic 2020-2022 (2023). World Bank Group. Retrieved from <http://surl.li/cpcdvy>.
10. Global GDP (2024). Retrieved from <https://www.worldometers.info/gdp/#gdpyear>.
11. The Top 50 Container Ports (2024). World Shipping Council. Retrieved from <https://www.worldshipping.org/top-50-ports>.
12. The Largest Ports in Europe. ShipHub (2024). Retrieved from <https://www.shiphub.co/the-largest-ports-in-europe/>.
13. Gross weight of seaborne goods handled at ports in the European Union (EU-27) from 2011 to 2021 (2022). Retrieved from <https://surl.li/ayheqf>.
14. Priorities investments in ports (2024). Retrieved from <https://www.feport.eu/media-corner-2/investments-in-ports>.
15. The investment pipeline and challenges of European ports: Port investments study 2024 (2024). 16. Brussels: European Sea Ports Organization. 27 p.
16. List of Sea Ports in the Core and Comprehensive Networks (2014). European Commission. Retrieved from <https://surl.li/gbjikz>.
17. Position of the European Sea Ports Organization on the Regulation 1315/2013 on Union guidelines for the development of the Trans-European Transport network (2019). ESPO. 11 p.
18. Pavlenko D. (2020). Global and national port trends 2030: Infrastructure Talks with experts. Deloitte. Retrieved from: <https://surl.li/gszypo>.

МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.4

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2025.1-24.02>

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧИХ СИСТЕМ У СКЛАДІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК СУДЕН РІЗНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Г.В. Кузнецов¹, Ю.М. Харитонов²

¹аспірант, Навчально-науковий центр Морської Інфраструктури,
Національний університет кораблебудування імені Адмірала Макарова,
Миколаїв, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-0827-7480

²д.т.н., професор, керівник Навчально-наукового центру Морської Інфраструктури,
Національний університет кораблебудування імені Адмірала Макарова,
Миколаїв, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-2425-1758

Анотація

Одним з актуальних напрямків зменшення витрати палива та шкідливих речовин у навколишнє середовище є додаткове використання в складі суднових енергетичних установок теплоакumuлюючих систем на базі теплових акумуляторів з фазовим переходом, що дозволяють забезпечити передпускову підготовку двигунів та загальносуднові потреби. Метою дослідження є визначення показників ефективного використання теплоакumuлюючих систем для передпускової підготовки двигунів та санітарно-побутових потреб персоналу на борту судна в умовах різних експлуатаційних циклів суднових енергетичних установок. Для трьох типів суден, а саме круїзного лайнера, балкеру і танкеру відповідно розглянуто використання теплоакumuлюючих систем у складі дизель-електричної та дизельних установок. Утилізація теплоти відпрацьованих газів дизельних двигунів здійснювалася в глушниках-теплоакumuляторах з фазовим переходом. Енергоефективність використання досліджених теплоакumuлюючих систем визначалася показниками використання теплоти та відносної економії палива з урахуванням вибраних теплоакumuлюючих матеріалів та експлуатаційних циклів суднових енергетичних установок. Використання в суднових дизель-електричних та дизельних установках теплоакumuлюючих систем за рахунок скидної теплоти відпрацьованих газів дозволило розширити функціональні можливості забезпечення потреб енергетичних установок та персоналу. В результаті математичного моделювання отримано базу даних для рекомендації оптимального вибору проектних рішень та експлуатаційних характеристик суднових енергетичних установок з теплоакumuлюючими системами. Використання в теплоакumuлюючих

системах вибраних матеріалів дозволяє отримати відносну економію палива за рейс на рівні 0,3...0,6% для круїзного лайнера. При використанні теплоакмулюючих систем в складі суднових енергетичних установок балкеру та танкеру з вибраними теплоакмулюючими матеріалами для передпускової підготовки головного двигуна та санітарно-побутових потреб відносна економія палива нижче ніж для круїзного лайнеру. Тому більш ефективно використання теплоакмулюючих систем у даних суднах потребує узгодження з додатковими потребами при здійсненні рейсу.

Ключові слова: дизель-електрична, дизельна, утилізація теплоти, економія палива, круїзний лайнер, балкер, танкер.

EFFICIENCY OF USING THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS AS PART OF MARINE POWER PLANTS FOR VESSELS OF VARIOUS PURPOSES

H.V. Kuznetsov¹, Yu.M. Kharytonov²

¹Phd student, Educational and scientific center of marine infrastructure,
Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
Mykolaiv, Ukraine,

ORCID ID: 0000-0002-0827-7480

²Doctor of Technical Sciences, professor,
Head of Educational and scientific center of marine infrastructure,
Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
Mykolaiv, Ukraine,

ORCID ID: 0000-0002-2425-1758

Summary

One of the topical areas of reducing fuel consumption and harmful substances into the environment is the additional use of thermal energy storage systems based on phase-change thermal energy storages as part of marine power plants, which allow pre-start up engine preparation and general vessel needs. The aim of the research is to determine the thermal energy storage systems efficient use indicators for pre-start up engine preparation and sanitary needs of personnel onboard under conditions of different marine power plants operational cycles. For three types of vessels, namely a cruise ship, a bulk carrier and a tanker, respectively, the use of thermal energy storage systems as part of diesel-electric and diesel plants is considered. The heat of exhaust gases from diesel engines was utilized in silencers-thermal energy storages with a phase change. The energy efficiency of the studied thermal energy storage systems was determined by the heat utilization and relative fuel economy, taking into account the selected materials and operating cycles of marine power plants. The use of thermal energy storage systems in marine diesel-electric and diesel plants at the expense of waste heat from exhaust gases has made it possible to expand the functionality of meeting the needs of power plants and personnel. As a result of mathematical modelling, a database was obtained to recommend the optimal choice of design solutions and operational characteristics of marine power plants with thermal energy storage systems. The use of the selected thermal energy storage materials in the thermal energy storage systems allows to obtain relative fuel savings per voyage on the level from 0.3 to 0.6% for the cruise ship, respectively. When using thermal energy storage system as part of the bulk

carrier and tanker marine power plants with selected thermal energy storage materials for pre-start up preparation of the main engine and sanitary needs, the relative fuel savings per voyage is lower than for the cruise ship. So the possibility of more efficient use of thermal energy storage systems in these vessels requires coordination, which is associated with additional needs during the voyage.

Key words: *diesel-electric, diesel, heat recovery, fuel economy, cruise ship, bulk carrier, tanker.*

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Більш ефективне використання енергетичних ресурсів є глобальним завданням для усього морського та внутрішнього транспорту. Вимоги ІМО щодо судових енергетичних установок (СЕУ) визначаються завданнями зменшення їх витрати палива та шкідливих речовин у навколишнє середовище. У даний час науковими та практичними завданнями, що пов'язані з пріоритетними тематичними напрямками наукових досліджень і науково-технічних розробок щодо енергетики та енергоефективності, є підвищення ефективності способів утилізації теплоти відпрацьованих газів, які використовуються у СЕУ. Одним з актуальних напрямків утилізації є додаткове використання в складі СЕУ теплоакumuлюючих систем (ТАС) на базі теплових акумуляторів з фазовим переходом, що дозволяють забезпечити передпускову підготовку двигунів СЕУ та загальносуднові потреби.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання цієї проблеми, і виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Питанню використання теплових акумуляторів з фазовим переходом на судах присвячена певна кількість публікацій в яких отримані наступні результати: обґрунтовано спосіб утилізації теплоти відпрацьованих газів при застосуванні системи теплової підготовки, яка призначена для прогріву охолоджуючої рідини, блоку циліндрів та головки блоку циліндрів для суден портофлоту [1]; тепловий акумулятор за рахунок температурного потенціалу відпрацьованих газів дозволяє виконати попередній прогрів дизельного двигуна СЕУ від температури оточуючого середовища +5°C до температури 50 °C [2, 3], запуск дизеля при температурі системи охолодження у межах від +40 до 50°C дозволяє забезпечити подальшу роботу, що сприяє швидкому та ефективному прогріву двигуна до оптимальної температури системи охолодження +85°C та її підтримці в межах 85±5°C за рахунок використання накопиченої теплоти в акумуляторі [2–4].

Визначені перспективні схеми для передпускового прогріву дизельного двигуна портового буксиру, які задовольняють прийнятим нормативним вимогам, а також собівартості системи, її надійності та безпеки під час експлуатації [5].

Проведений аналіз літературних джерел показує, що при дослідженнях використання ТАС у складі СЕУ не враховувалися комплексне забезпечення енергоефективності з урахуванням експлуатаційних циклів суден, властивостей теплоакumuлюючих матеріалів, циклів зарядка – розрядка акумуляторів та напрямків використання акумуляованої теплоти, тому дане завдання є актуальним і потребує подальшого дослідження.

Формулювання мети статті, постановка завдання. Метою дослідження є визначення показників ефективного використання ТАС для передпускової

підготовки двигунів та санітарно-побутових потреб персоналу на борту судна в умовах різних експлуатаційних циклів СЕУ. Для досягнення цієї мети визначені наступні завдання:

1. Визначити функціональні можливості ТАС для забезпечення потреб енергетичних установок та загальносуднових потреб;
2. Оцінити показники ефективності використання ТАС для двигунів у складі СЕУ;
3. Визначити показники теплової ефективності використання ТАС в залежності від характеристик джерела акумульованої теплоти та використання теплоакumuлюючих матеріалів.

Об'єктом дослідження є процеси утилізації, акумулювання і використання теплоти з визначенням енергоефективності ТАС в СЕУ.

Предметом дослідження є показники ефективності використання ТАС у складі дизель-електричної і дизельних установок та їх залежності від структури елементів системи, теплофізичних властивостей теплоакumuлюючих матеріалів та експлуатаційних характеристик СЕУ.

Методи дослідження – математичне моделювання процесів, аналіз показників використання теплоти та синтез щодо рекомендацій оптимального вибору проектних рішень та експлуатаційних характеристик різного типу СЕУ з ТАС.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Дослідження виконані для дизель-електричної та дизельних установок на прикладі відповідно круїзного лайнеру «Spirit of Discovery», балкеру «Kai Oldendorff» та танкеру «Eagle Barcelona».

Енергетична установка круїзного лайнеру складається з чотирьох дизельних двигунів MAN 32/44 9L потужністю 5400 кВт кожен, чотирьох електрогенераторів Siemens з характеристиками: 720 об/хв, 5400 кВт, двох гвинто-рульових колонок Siemens SISHIP eSiPOD 10M [6]; схема установки приведена на рисунку 1 [8].

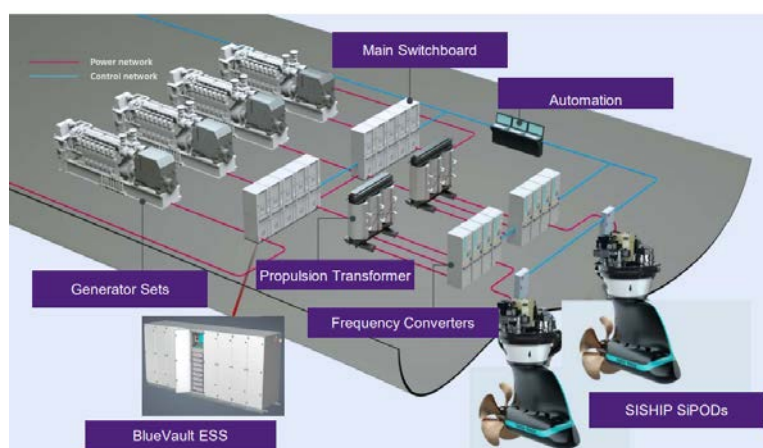


Рис. 1. Схема дизель-електричної установки круїзного лайнеру «Spirit of Discovery»

Особливістю експлуатаційного циклу СЕУ даного лайнера є використання в режимі ходу зі швидкістю 19 вузлів трьох двигунів при потужності на рівні 0,8 від номінального значення кожного двигуна, а при стоянці у порту – одного двигуна для загальносуднових потреб [6].

Дизельна установка балкеру складається з одного дизельного двигуна MANS60ME-C8.5 потужністю 14940 кВт, трьох дизель-генераторів Yanmar 6EY18ALW з характеристиками 600 кВт, 900 об/хв та гвинта фіксованого кроку [6].

Для танкеру енергетична установка складається з одного дизельного двигуна MAN 6G60ME-C9.5 потужністю 16080 кВт, трьох дизель-генераторів та гвинта фіксованого кроку [7].

Схеми дизельної установки балкеру та танкеру аналогічні, тому на рисунку 2 [6] представлена дизельна установка для балкеру.

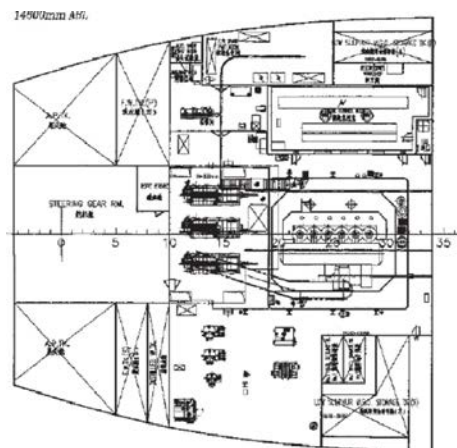


Рис. 2. Схема дизельної установки балкеру

ТАС для СЕУ розглянутих суден розроблені на базі їх систем газовихлопу. Характеристики глушників-теплоаккумуляторів з вибраними теплоакмулюючими матеріалами у складі газоходів СЕУ круїзного лайнеру наведені у таблиці 1.

Для СЕУ балкеру та танкеру ТАС розроблено аналогічно круїзному лайнеру і яка для головного двигуна складається з одного газоходу та глушника-теплоаккумулятора з вибраними теплоакмулюючими матеріалами, характеристики якого наведені у таблиці 2.

Таблиця 1

Характеристики глушників-теплоаккумуляторів ТАС у складі дизель-електричної установки круїзного лайнеру «Spirit of Discovery»

Двигун	Джерело теплоти	Теплоакмулюючий матеріал	Потенціал акумульованої теплоти, кДж
MAN 32/44	Відпрацьовані гази	LiNO ₃	2,858 · 10 ⁶
		NaNO ₂	2,220 · 10 ⁶
		LiCl(37)–63LiOH	4,375 · 10 ⁶

Таблиця 2

Характеристики глушників-теплоаккумуляторів ТАС у складі дизельних установок балкери «Kai Oldendorff» та танкеру «Eagle Barcelona»

Судно	Двигун	Джерело теплоти	Теплоакуюлюючий матеріал	Потенціал акумульованої теплоти, кДж
Балкер	MAN S60ME-C8.5	Відпрацьовані гази	Ва(ОН)2·5Н2О Галакрірол Еритритол	1,492·106
Танкер	MAN 6G60ME-C9.5			1,213·106
				1,144·106

Загальна схема компоновки ТАС для СЕУ розглянутих суден представлена на рисунку 3. Глушник-теплоаккумулятор входить до системи газовихлопу. При працюючому двигуні, відпрацьовані гази проходять через глушник-теплоаккумулятор, а теплота цих газів шляхом теплопередачі передається теплоакуюлючому матеріалу. У результаті фазового переходу матеріалу в акумуляторі накопичується певний запас теплоти. Для передпускової підготовки двигунів та санітарно-побутових потреб необхідна кількість теплоти відводиться від глушника-теплоакуюлятора.

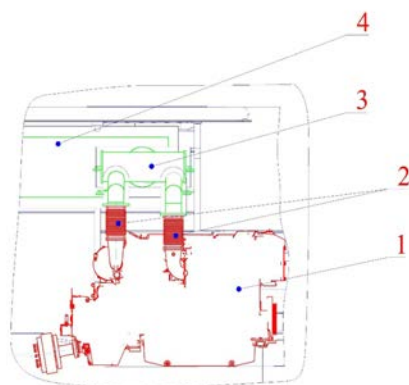


Рис. 3. Схема компоновки СЕУ з ТАС (вид збоку): 1 – дизельний двигун, 2 сифонні компенсатори, 3 – патрубок газоходу, 4 – глушник-теплоакуюлятор

Вихідні дані для математичної моделі взято наступним чином, а саме: склад енергетичної установки, тип двигунів, їх техніко-економічні показники, обладнання системи газівихлопу, кількість екіпажу та пасажирів, експлуатаційні цикли СЕУ [6–8, 9–13]; теплофізичні показники теплоакуюлюючих матеріалів [14].

Алгоритм математичної моделі, який реалізований в програмному середовищі Mathcad, наведений в [15], який складається з процедури розрахунку маси та кількості теплоти, яка необхідна для фазового переходу теплоакуюлюючого матеріалу в глушник – тепловому акумуляторі для головних та допоміжних двигунів; розрахунок циклу зарядка-розрядка під час здійснення рейсу судна з урахуванням розподілу акумульованої теплоти на передпускову підготовку двигунів та санітарно-побутові потреби персоналу.

Для розглянутих типів СЕУ енергоефективність ТАС визначена критеріями оптимальності у вигляді наступних показників: ефективності використання ТАС ($\eta_{\text{ТАС}}$), який дорівнює відношенню теплоти, що споживається від ТАС на суднові потреби до утилізованої від джерел СЕУ; теплової ефективності ТАС (E_T), який характеризує загальну економію палива енергетичної установки з ТАС в залежності від джерел акумульованої теплоти та відносної економії палива за рейс. Сукупність представлених показників ефективності ТАС забезпечує отримання бази даних для рекомендації оптимального вибору проектних рішень та експлуатаційних характеристик суднових енергетичних установок.

Значення вищенаведених показників для розглянутих суден наведені у таблиці 3. Експлуатаційний рейс для розглянутих суден брався 7 діб з трьома зупинками для круїзного лайнера та з двома зупинками для балкера та танкера.

Таблиця 3

Показники ефективності використання ТАС суден

Судно	Теплоакуюлюючий матеріал	Кількість персоналу на судні під час зупинки, %	Показники ефективності		
			Показник ефективності використання ТАС, $\eta_{\text{ТАС}}$	Показник теплової ефективності ТАС, E_T	
			Головний двигун влітку/взимку	Головний двигун влітку/взимку	
Круїзний лайнер «Spirit of Discovery»	LiNO ₃	10	0,195/0,210	0,093/0,101	
		25	0,426/0,442	0,205/0,212	
	NaNO ₂	10	0,250/0,271	0,120/0,130	
		25	0,549/0,569	0,263/0,273	
	LiCl(37)–63LiOH	10	0,127/0,137	0,061/0,066	
		25	0,278/0,289	0,134/0,139	
Балкер «Kai Oldendorff»	Ba(OH) ₂ ·5H ₂ O	50	0,531/0,541	0,255/0,260	
		25	0,428/0,570	0,205/0,273	
		75	0,497/0,638	0,238/0,306	
	Галакрірол	25	0,526/0,700	0,253/0,336	
		50	0,611/0,785	0,293/0,377	
		75	0,695/0,870	0,334/0,418	
	Еритритол	25	0,558/0,743	0,268/0,356	
		50	0,648/0,832	0,311/0,400	
		75	0,737/0,922	0,354/0,443	
	Танкер «Eagle Barcelona»	Ba(OH) ₂ ·5H ₂ O	25	0,346/0,447	0,166/0,214
			50	0,444/0,545	0,213/0,262
			75	0,542/0,643	0,260/0,309
Галакрірол		25	0,425/0,549	0,204/0,264	
		50	0,546/0,670	0,262/0,322	
		75	0,667/0,791	0,320/0,380	
Еритритол		25	0,451/0,583	0,216/0,280	
		50	0,579/0,711	0,278/0,341	
		75	0,707/0,839	0,339/0,403	

персоналу на судні, яка залишається під час зупинки у порту була оцінена експертним шляхом з урахуванням призначення судна.

Економія палива за рахунок використання ТАС у складі СЕУ наведена у таблиці 4, де паливо заощаджене під час рейсу розраховано на одну зупинку судна, а відносна економія наведена для усього рейсу.

Таблиця 4

Економія палива за рахунок використання ТАС

Судно	Теплоакуючий матеріал	Паливо заощаджене під час рейсу на одну зупинку, кг влітку/взимку	Відносна економія палива за рейс, % влітку/взимку
Круїзний лайнер «Spirit of Discovery»	LiNO ₃	492/466	0,4/0,4
	NaNO ₂	367/341	0,3/0,3
	LiCl(37)–63LiOH	789/657	0,6/0,5
Балкер «Kai Oldendorff»	Ba(OH) ₂ ·5H ₂ O	72	0,03
	Галакрірол	58	0,03
	Еритритол	55	0,03
Танкер «Eagle Barcelona»	Ba(OH) ₂ ·5H ₂ O	71	0,04
	Галакрірол	58	0,04
	Еритритол	55	0,04

Використання ТАС у складі СЕУ круїзного лайнера для семиденного рейсу при використанні теплоакуючих матеріалів LiNO₃, NaNO₂ та LiCl(37)–63LiOH у складі чотирьох глушників-теплоакуючаторів забезпечило відносну економію палива влітку відповідно 0,4%, 0,3% та 0,6% та взимку – 0,4%, 0,3% та 0,5%.

При використанні ТАС в складі СЕУ балкеру та танкеру для передпускової підготовки головного двигуна та санітарно-побутових потреб відносна економія палива при матеріалах Ba(OH)₂·5H₂O, Галакрірол, Еритритол склала відповідно 0,03% для балкеру та від 0,04% для танкеру, тому можливість більш ефективного використання ТАС у даних суднах потребує узгодження, що пов'язані з додатковими потребами при здійсненні рейсу.

Висновки. 1. Використання в суднових дизель-електричних та дизельних установках теплоакуючих систем за рахунок скидної теплоти відпрацьованих газів дозволило розширити функціональні можливості забезпечення потреб енергетичних установок та персоналу.

2. Сукупність визначених показників ефективності теплоакуючих систем забезпечує базу даних для оптимального вибору проектних рішень та експлуатаційних характеристик суднових енергетичних установок з теплоакуючими системами.

3. Використання в теплоакуючих системах вибраних теплоакуючих матеріалів дозволяє отримати відносну економію палива за рейс в межах 0,3–0,6% для круїзного лайнера.

4. При використанні теплоакуючих систем в складі суднових енергетичних установок балкеру та танкеру для загальносуднових потреб відносна економія палива склала для балкеру 0,03% та 0,04% для танкеру, тому можливість більш ефективного використання теплоакуючих систем у даних суднах потребує узгодження, що пов'язані з додатковими потребами при здійсненні рейсу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дехтяренко М. В. Покращення паливної економічності суднової енергетичної установки засобами ресурсозберігаючої теплової підготовки двигуна. *Сучасні проблеми морського транспорту та безпека мореплавства*: матеріали ІХ Всеукр. студент. наук. конференції. Херсон, 2019. С. 30–32.
2. Погорлецький Д. С., Грицук І. В., Симоненко Р. В., Білай А. В., Котов А. І. Формування системи теплової підготовки транспортного засобу, працюючого на зрідженому газовому паливі: матеріали VI Міжн. Науково-Технічної конференції, присвяченої 150-літтю від дня народження Некрасова І. С. Миколаїв, 2020.
3. Грицук І. В., Погорлецький Д. С., Худяков І. В., Дзигар А. К., Волков В. В. Теплова підготовка двигуна енергетичної установки судна портового флоту. *Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту*: матеріали XI Міжн. Наук.-Практ. конф. Ізмаїл, 2020.
4. Грицук І. В., Погорлецький Д. С., Вербовський В. С., Вольська О. М., Вербовський О. В., Сімагін А. Ф. Забезпечення теплової підготовки двигуна енергетичної установки за допомогою системи прогріву з фазоперехідними тепловими акумуляторами: матеріали Міжнар. наук.-практ. конференції, присвяченої пам'яті професорів Фоміна Ю.Я. і Семенова В.С. Одеса (Україна) – Стамбул (Туреччина) – Одеса (Україна), 2019.
5. Варшамов А. В., Голеншин В. В., Харитонов М. Ю. Вибір перспективних схем теплоакмулюючих систем передпускового прогріву двигунів внутрішнього згоряння. *Наукові праці. Техногенна безпека. Радіобіологія*. 2016. №268, т. 280. С. 22–27.
6. Significant Ships of 2019. A Publication of the Royal Institution of Naval Architects. URL: <http://www.snc.ro/upload/20200201significantships2019small-1599829039.pdf> (дата звернення: 01.02.2025).
7. Significant Ships of 2018. A Publication of the Royal Institution of Naval Architects. URL: <https://rina.org.uk/publications/significant-ships/> (дата звернення: 01.02.2025).
8. Behrens H. Hybrid Propulsion Solutions for ships. Siemens Energy. 2022. URL: https://www.ordemengenheiros.pt/fotos/editor2/dossiers/siemens_energy_marine.pdf (дата звернення: 01.02.2025).
9. Ocean Cruises: веб-сайт. URL: <https://travel.saga.co.uk/cruises/ocean.aspx> (дата звернення: 01.02.2025).
10. MAN L32/44 GenSet. Project Guide – Marine. Four-stroke diesel engine compliant with IMO Tier III. URL: https://www.man-es.com/docs/default-source/projectguidesde_projectguidesde_files/man-l32-44-genset-imo-tier-iii-marine.pdf?sfvrsn=9e0eb17a_1 (дата звернення: 02.02.2025).
11. S60ME-C10.5-GI. Technical Documentation. Project guide. URL: https://man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/printed/S60ME-C10_5-GI.pdf (дата звернення: 02.02.2025).

12. G60ME-C9.5-GIE. Technical Documentation. Project guide. URL: https://man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/printed/G60ME-C9_5-GIE.pdf (дата звернення: 02.02.2025).
13. Vessel Finder: веб-сайт. URL: <https://www.vesselfinder.com> (дата звернення: 02.02.2025).
14. Kenisarin M. M. High-temperature phase change materials for thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. №14. P. 955-970.
15. Кузнецов Г. В. Математична модель теплоакumuлюючої системи у складі енергетичної установки надводного корабля. *Збірник Наукових праць НУК*. 2023. № 1. С. 128–134.

REFERENCES

1. Dekhtyarenko, M. V. (2019). *Pokrashchennya palyvnoyi ekonomichnosti sudnovoyi enerhetychnoyi ustanovky zasobamy resursozberihayuchoyi teplovoyi pidhotovky dvyhuna* [Improving the fuel efficiency of a ship's power plant by means of resource-saving thermal preparation of the engine], Modern problems of maritime transport and maritime safety: materials of the IX All-Ukrainian student scientific conference. Kherson [in Ukrainian].
2. Pogorletsky, D. S., Hrytsuk, I. V., Symonenko, R. V., Bilay, A. V., Kotov, A. I. (2020). *Formuvannya systemy teplovoyi pidhotovky transportnoho zasobu, pratsyuyuchoho na zridzhenomu hazovomu palyvi* [Formation of a thermal preparation system for a vehicle running on liquefied gas fuel], materials of the VI International Scientific and Technical Conference dedicated to the 150th anniversary of the birth of Nekrasov I. S. Mykolaiv [in Ukrainian].
3. Hrytsuk, I. V., Pogorletsky, D. S., Khudyakov I. V., Dzygar, A. K., Volkov, V. V. (2020). *Teplova pidhotovka dvyhuna enerhetychnoyi ustanovky sudna portovoho flotu* [Thermal preparation of the power plant engine of a port fleet vessel], Modern approaches to the highly efficient use of means of transport: materials of the XI International Scientific-Practical Conference. Izmail [in Ukrainian].
4. Hrytsuk, I. V., Pogorletskyi, D. S., Verbovskyi, V. S., Volska, O. M., Verbovskyi, O. V., Simagin, A. F. (2019). *Zabezpechennya teplovoyi pidhotovky dvyhuna enerhetychnoyi ustanovky za dopomohoyu systemy prohrivu z fazoperekhidnyimi teplovymi akumulyatoramy* [Ensuring thermal preparation of the power plant engine using a warm-up system with phase-transition thermal energy storages], materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of Professors Fomin Yu. Ya. and Semenov V. S. Odesa (Ukraine) – Istanbul (Turkey) – Odesa (Ukraine) [in Ukrainian].
5. Varshamov, A. V., Golenshin, V. V., Kharytonov, M. Y. (2016). Selection of promising schemes of heat storage systems for pre-heating of internal combustion engine. *Scientific works. Technogenic safety. Radiobiology*, № 268, t. 280, pp. 22–27 [in Ukrainian].

6. Significant Ships of 2019. A Publication of the Royal Institution of Naval Architects. Retrieved from: <http://www.snc.ro/upload/20200201significantships2019small-1599829039.pdf>.
7. Significant Ships of 2018. A Publication of the Royal Institution of Naval Architects. Retrieved from: <https://rina.org.uk/publications/significant-ships/>.
8. Behrens, H. (2022). Hybrid Propulsion Solutions for ships. Siemens Energy. Retrieved from: https://www.ordemengenheiros.pt/fotos/editor2/dossiers/siemens_energy_marine.pdf.
9. Ocean Cruises. Retrieved from: <https://travel.saga.co.uk/cruises/ocean.aspx>.
10. MAN L32/44 GenSet. Project Guide – Marine. Four-stroke diesel engine compliant with IMO Tier III. Retrieved from: https://www.man-es.com/docs/default-source/projectguidesde_projectguidesde_files/man-l32-44-genset-imo-tier-iii-marine.pdf?sfvrsn=9e0eb17a_1.
11. S60ME-C10.5-GI. Technical Documentation. Project guide. Retrieved from: https://man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/printed/S60ME-C10_5-GI.pdf.
12. G60ME-C9.5-GIE. Technical Documentation. Project guide. Retrieved from: https://man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/printed/G60ME-C9_5-GIE.pdf.
13. Vessel Finder: веб-сайт. Retrieved from: <https://www.vesselfinder.com>.
14. Kenisarin, M. M. (2010). High-temperature phase change materials for thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, № 14, pp. 955–970.
15. Kuznetsov, H. V. (2023). Mathematical model of the heat storage system as part of a surface ship power plant. *Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding*, № 1, pp. 128–134 [in Ukrainian].

**СУЧАСНІ МЕТОДИ ТА НАПРЯМКИ ДОСЛІДЖЕНЬ
ПО ЗНИЖЕННЮ РІВНЯ ГІДРОАКУСТИЧНИХ ШУМІВ СУДНА**

В.Ю. Кучеренко¹, М.П. Булгаков²

¹аспірант кафедри «Судноводіння та безпеки на морі»,
старший викладач кафедри «Судноводіння та безпеки на морі»,
Одеський Національний Морський Університет,
Одеса, Україна,

ORCID ID: 0009-0008-4906-9726

²к.т.н, доцент кафедри «Судноводіння та безпеки на морі»,
Одеський Національний Морський Університет,
Одеса, Україна,

ORCID ID: 0000-0002-7172-8678

Анотація

Вступ. Морське судноплавство є одним із ключових джерел акустичного забруднення в морському середовищі. Генерація шуму, викликана механічними, гідродинамічними та аеродинамічними процесами, впливає як на роботу суден, так і на морську екосистему. Шум, що випромінюється суднами, створює значні перешкоди для морських ссавців, порушуючи їхні поведінкові і міграційні патерни. Основними джерелами шуму є кавітація гребних гвинтів, механічні вібрації двигунів та допоміжних систем, а також гідродинамічна турбулентність. Розробка методів та моделей по зменшенню акустичного забруднення регламентована стандартами та рекомендаціями ІМО MSC.337(91) та комітету із захисту морського середовища (MEPC 80).

Мета. Метою дослідження є аналіз існуючих підходів та методів що до мінімізації акустичного шуму, який генерують морські судна. Завдання включають вивчення технічних аспектів виникнення гідроакустичного шуму, пропозиції нових напрямків досліджень по створенню сучасних систем контролю та управління механічними процесами, які є джерелом акустичного забруднення.

Результати. У статті проведено аналіз та огляд існуючих підходів до зменшення рівня гідроакустичного шуму, розглянуто основні джерела шумового забруднення, їх вплив на судові конструкції та навколишнє середовище. Автор вважає доцільним проведення наукових досліджень з метою розробки інтелектуальної системи моніторингу, яка забезпечить аналіз параметрів вібрацій судових двигунів, акустичного шуму та рівня підвищення нерівномірності обертання колінчастого валу головного двигуна (ГД) в реальному часі. Це дозволить оптимізувати режими роботи двигунів, зменшити нерівномірність обертання колінчастого валу ГД за рахунок корекції одного або декількох параметрів, таких як швидкість, курс, крен та диферент судна. Як наслідок, очікується зменшення рівня структурного та підводного шуму судна, а також система дозволить своєчасно виявляти критичні відхилення в роботі судових механізмів. Крім того перспективними є розробки балансувальних пристроїв, з урахуванням новітніх

матеріалів, які зменшують торсійні коливання і структурний шум. Оптимізація профілів гребних гвинтів і використання шумоізоляційних матеріалів сприяє зниженню гідроакустичного впливу.

Висновок. Зростання акустичного забруднення в умовах інтенсивного розвитку морського транспорту вимагає інтегрованих технічних та екологічних підходів. Запропоновані рішення, спрямовані на зниження шуму та вібрацій, є перспективними для застосування у сучасному суднобудуванні та судноплаванні. Інноваційні методи зменшення шумового впливу дозволяють підвищити ефективність роботи суден і одночасно мінімізувати негативний вплив на морське середовище.

Ключові слова: акустичний шум, морське середовище, структурний шум, колінчастий вал, демпфери, гідрофони, головний двигун, шумоізоляція.

INNOVATIVE METHODS AND RESEARCH DIRECTIONS FOR REDUCING SHIP HYDROACOUSTIC NOISE

V.Y. Kucherenko¹, M.P. Bulgakov²

¹PhD student of the Department of «Navigation and Safety at Sea»,
Senior Lecturer of the Department of «Navigation and Safety at Sea»,
Odessa National Maritime University,
Odessa, Ukraine,

ORCID ID: 0009-0008-4906-9726

²PhD, Associate Professor of the Department of «Navigation and Safety at Sea»,
Odessa National Maritime University,
Odessa, Ukraine,

ORCID ID: 0000-0002-7172-8678

Summary

Introduction. Maritime shipping is one of the primary sources of acoustic pollution in the marine environment. Noise generation, caused by mechanical, hydrodynamic, and aerodynamic processes, affects both ship operations and marine ecosystems. Noise emitted by ships creates significant disruptions for marine mammals, interfering with their behavioral and migratory patterns. The primary sources of noise include cavitation of propellers, mechanical vibrations of engines and auxiliary systems, and hydrodynamic turbulence. The development of methods and models for reducing acoustic pollution is regulated by the standards and recommendations of IMO MSC.337(91) and the Marine Environment Protection Committee (MEPC 80).

Objective. The aim of this study is to analyze existing approaches and methods for minimizing acoustic noise generated by maritime vessels. The research tasks include studying the technical aspects of hydroacoustic noise generation, proposing new research directions for the development of modern control and management systems for mechanical processes that contribute to acoustic pollution.

Results. The article provides an analysis and review of existing approaches to reducing hydroacoustic noise levels, examines the main sources of noise pollution, and assesses their impact on ship structures and the surrounding environment. The author highlights the necessity of conducting scientific research to develop an intelligent monitoring system that enables real-time analysis of ship engine vibrations, acoustic

noise levels, and the degree of increased uneven rotation of the main engine crankshaft. This system would optimize engine operation modes and reduce crankshaft unevenness by adjusting one or more parameters, such as speed, course, roll, and trim of the vessel. Consequently, a reduction in both structural and underwater noise levels is expected. Additionally, the system will allow for timely detection of critical deviations in the operation of ship mechanisms. Further research in the development of balancing devices incorporating advanced materials to reduce torsional vibrations and structural noise is also considered promising. Optimization of propeller blade profiles and the use of soundproofing materials contribute to reducing hydroacoustic impact.

Conclusion. The increase in acoustic pollution amid the rapid development of maritime transport necessitates integrated technical and environmental approaches. The proposed solutions, aimed at reducing noise and vibration, are promising for modern shipbuilding and navigation. Innovative methods for noise impact reduction improve ship operational efficiency while simultaneously minimizing negative effects on the marine environment.

Key words: acoustic noise, marine environment, structural noise, crankshaft, dampers, hydrophones, main engine, soundproofing.

Постановка проблеми. Зростання обсягу морського судноплавства, хоча й важливо для світової торгівлі та економіки, породжує серйозні проблеми в сфері збереження морського середовища. Однією з таких проблем є акустичне забруднення від морських суден, яке може суттєво впливати на морську біорізноманітність екосистеми. Це викликає необхідність удосконалення методів контролю та розробку заходів по зменшенню акустичних викидів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Акустичні шуми в морському середовищі є важливим об'єктом дослідження, оскільки вони впливають на навколишнє середовище.

Регламентовані методи та принципи заміру грають ключову роль у контролі та зменшенні впливу підводних акустичних шумів [1, с. 3–5].

Гідрофони є основними інструментами для заміру акустичних шумів у воді. Вони перетворюють звукові хвилі в електричні сигнали. Використовуються різні типи гідрофонів, такі як п'єзоелектричні та векторні гідрофони. Їх використовують у гідроакустичних мережах для оцінки напрямків та інтенсивності звукових джерел [1, с. 8].

Bureau Veritas, як провідна міжнародна організація з класифікації та сертифікації морських об'єктів, регулює методи заміру підводних акустичних шумів. Вони використовуються для оцінки впливу суден та інших підводних конструкцій на морське середовище. Методи включають гідрофонні заміри, використання акустичних маяків та технічні рішення для зниження шумового викиду.

DNV (Det Norske Veritas): DNV визначає стандарти для оцінки та контролю акустичних характеристик суден та морських конструкцій. Гідрофонні мережі використовуються для замірів, але DNV також регулює використання біометричних методів для оцінки впливу на морську біорізноманітність.

IMO MSC.337(91): IMO визначає стандарти для обмеження акустичного випромінювання від суден. Стандарт MSC.337(91) визначає обов'язкові вимоги щодо обмеження шумового впливу від суден.

ABS Guide for Underwater Inspection: ABS надає керівництво щодо методів та стандартів для підводного огляду. Включає вимоги до методів заміру підводних акустичних шумів.

Експериментальні результати свідчать про можливість ідентифікації основних джерел шуму на судні, коли відомі частоти обертання головного двигуна, дизель-генераторів та інших механізмів судна. Спектральний розподіл рівня звукового тиску (SPL), отриманий за допомогою сигналів з гідрофону в діапазоні від 5 Гц до 120 кГц, та характерні частоти, пов'язані з рухом судна, ілюструються на Рис. 1, [2].

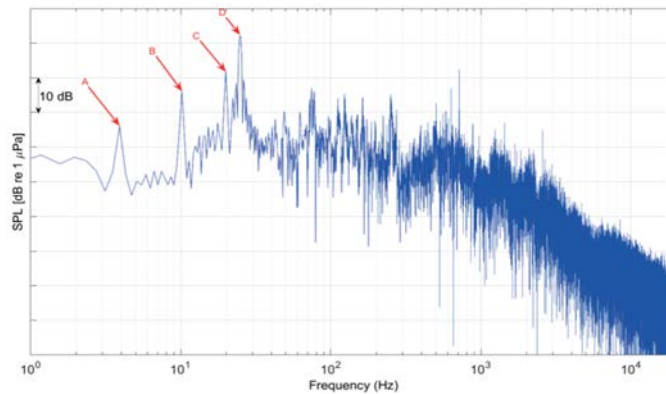


Рис. 1. А – 2 гребні вали, швидкість обертання 234 об/хв, В – 2 головні двигуни, швидкість обертання 600 об/хв, С – 2 гвинта з п'ятьма лопатками, швидкість обертання 234 об/хв, D – генератори, швидкість обертання 1500 об/хв. Спектр сигналу отриманого за проміжок часу 2 с, коли судно перебувало на мілководді [2]

Наприклад, максимальне гідроакустичне випромінювання суднового гвинта (пік С) відбувається на частоті

$$f = f_{rot} \cdot z, \quad (1)$$

де z – кількість лопаток, f_{rot} – частота обертанням суднового гвинта (Гц).

Для порівняння рівень звукового тиску (акустичного шуму), створюваного морськими організмами, значно нижчий, ніж у суден, і знаходиться в діапазоні частот від 20 Гц до 2 кГц за різними даними.

Треба зазначити що у спектрі сигналу на Рис. 1 присутні динамічні шуми океану, які утворюються хвилюванням, прибоєм на березі чи рифах, течією, дощем. Також вітрове хвилювання є джерелом шуму у глибокому океані на частотах 100 Гц – 50 кГц [2, с. 176-181].

Перспективні напрямки досліджень включають розробку математичних моделей, що враховують експериментальні данні і розкривають залежності між швидкістю судна, зміною курсу, частотою обертання головного двигуна та параметрами поширення підводних акустичних хвиль:

$$f = k \cdot V + m \cdot \theta + n \cdot S, I = a \cdot V + b \cdot \theta + c \cdot S, \quad (2)$$

де f – частота звуку, V – швидкість судна, θ – зміна курсу, S – частота обертання головного двигуна, k, m, n та a, b, c – коефіцієнти, що представляють залежність

зміни частоти та інтенсивності підводного звуку (I), від зміни швидкості судна, курсу та швидкістю обертання головного двигуна.

Формулювання цілей статті. Основною метою даної статті є комплексний аналіз та огляд існуючих методів зниження структурного та підводного шуму, що утворюється під час експлуатації суден, та обґрунтування перспективних підходів для його мінімізації. Дослідження зосереджене на виявленні основних джерел шумового впливу, серед яких механічні коливання, гідродинамічні процеси та підвищення рівня нерівномірності обертання колінчастого валу ГД, з метою визначення їхнього впливу у загальний рівень акустичного шуму. Особливу увагу приділено застосуванню методів вібродіагностики та спектрального аналізу акустичних сигналів для ідентифікації зон підвищеної вібрації та можливих резонансних явищ. Важливим аспектом є дослідження можливостей математичного моделювання, зокрема розрахунку рівня звукового тиску (SPL), а також впливу динамічних характеристик судових механізмів на поширення шуму у навколишньому середовищі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Найбільший вплив на біологічні об'єкти справляє низькочастотний акустичний шум, який може поширюватися на великі відстані.

Комітет із захисту морського середовища (МЕРС 80) у 2023 році затвердив переглянуті Рекомендації щодо зменшення підводного шуму від комерційного судноплавства для усунення негативного впливу на морське життя. Рекомендації МЕРС фокусуються на технічні та технологічні аспекти для зниження підводного шуму від суден. Вони визначають стандарти та норми, які мають дотримуватися судовласники та суднобудівники для мінімізації негативного впливу на морське середовище. Рекомендації включають в себе використання методів та технологій, таких як використання систем активного шумозаглушення, модифікація гідродинаміки судна та впровадження новітніх матеріалів для зменшення підводного акустичного шуму. МЕРС 80 встановлює технічні стандарти та вимоги, які повинні виконувати судовласники та оператори для дотримання норм щодо підводного акустичного шуму [3, с. 3–6].

Судовласники можуть використовувати активні системи шумозаглушення для компенсації та зниження акустичного впливу суден. Для цього може використовуватися математична модель активної компенсації шуму. Активна компенсація шуму є ефективним підходом для зменшення акустичного впливу в різних середовищах, включаючи морське. Математичні моделі для активної компенсації шуму дозволяють передбачати та компенсувати акустичні хвилі, щоб забезпечити зменшення загального рівня шуму.

Математична модель починається з розгляду акустичних хвиль, які вимірюються сенсорами. Пристрій генерує власні звуки, протилежні за фазою та амплітудою до оригінального шуму (*antison*).

$$X_{total} = X_{original} + X_{antison} \quad (3)$$

де, X_{total} – загальний акустичний сигнал, що формується в середовищі.

$X_{original}$ – вихідний (початковий) шум, що випромінюється судовими механізмами (головним двигуном, гребним гвинтом, дизель-генераторами).

$X_{antison}$ – створений компенсаційний шум, що має таку саму амплітуду, але протилежну фазу відносно $X_{original}$.

Математична формула для активної компенсації шуму може бути виражена як різниця оригінального сигналу $X_{original}$ та $X_{antison}$, що призводить до мінімізації об'єму шуму.

$$X_{compensated} = X_{original} - X_{antison} \quad (4)$$

де, $X_{compensated}$ – залишковий шум після компенсації

Також деякі зміни в конструктивних особливостях судна, зокрема в оптимізації гідродинаміки, можуть відповідати вимогам МЕРС 80 для зменшення акустичного сліду суден [3, с. 3–6]. Математичні моделі можуть враховувати вплив конкретних змін на рівень шуму. Керівні принципи, видані в циркулярній формі, визнають, що комерційне судноплавство є основним джерелом підводного випромінюваного шуму URN (Underwater Radiated Noise), який негативно впливає на критичні життєві функції широкого спектру морських мешканців. Документ містить оновлені технічні знання, включаючи посилання на міжнародні стандарти вимірювань, рекомендації та нормативні акти класифікаційного товариства. Наведено зразки шаблонів, які допомагають судновласникам розробити план управління підводним шумом [4, с. 12–16]. При проведенні вимірювань і досліджень характеристик URN, визначенні джерел випромінювання пропонується використовувати такі величини і поняття як:

– *Radiated Noise Level (RNL)*:

Рівень випромінюваного шуму (RNL) вказує на рівень акустичного шуму, який випромінюється або поширюється від джерела вздовж визначеного напрямку у відкритому просторі чи іншому середовищі.

Цей показник може бути визначений як рівень звуку у конкретний момент часу або як середній рівень протягом певного періоду.

RNL може бути виражений у децибелах (дБ) та враховувати характеристики шуму, такі як частота та інтенсивність. Математично це може бути представлено у вигляді логарифмічного виміру величини шуму в порівнянні з заданим референтним рівнем.

– *Underwater Radiated Noise (URN)*:

Підводний випромінюваний шум (URN) описує акустичний шум, який генерується та випромінюється водними об'єктами чи процесами, такими як судна, морські тварини або геологічні явища, і поширюється у воді.

Математично URN визначається шляхом вимірювання акустичного тиску та інтенсивності звуку у водному середовищі. Враховуючи властивості води, можна математично моделювати поширення звуку та його вплив на довкілля.

Документ (МЕРС 80) визначає, що основні джерела URN пов'язані з гребними гвинтами, формою та геометрією корпусу, бортовим обладнанням, кільватерним потоком, а також аспектами експлуатації та обслуговування. При типових робочих швидкостях, близьких до проектної швидкості судна, більша частина підводного шуму пов'язана з кавітацією гвинта. Шум пропелера сам по собі може бути домінуючим фактором, що впливає на загальний рівень URN [3, с. 2–6].

Конструктивно-технічні підходи до зниження шуму можливі на початковому етапі проектування і складання судна. Серед підходів та рекомендацій, представлених у Керівництві щодо зниження рівня RNL, можна виділити наступні :

– Конструкція та модифікація корпусу. Потік навколо корпусу може впливати на URN, оскільки форма корпусу впливає на потік води до гвинта. Відомо, що нерівномірний або неоднорідний кільватерний слід збільшує кавітацію гвинта. Тому форма корпусу судна повинна бути спроектована таким чином, щоб кільватерний слід був максимально однорідним.

– Конструкція і модифікація гребного гвинта. Гребні гвинти повинні бути зроблені та підібрані таким чином, щоб мінімізувати кавітацію при збереженні енергоефективності. При типових робочих швидкостях кавітація може бути зменшена за нормальних умов експлуатації завдяки хорошему дизайну гвинта, оптимізації навантаження, що забезпечує рівномірний потік води через гребні гвинти (в залежності від конструкції корпусу) і ретельний підбір таких характеристик гребного гвинта, як діаметр, кількість лопатей, площа лопатей, крок, нахил і поперечний переріз.

– Поліпшення потоку кільватерного сліду. Застосування пристроїв попередньої закрутки потоку перед гвинтом (PSS), які можуть зменшити шум частоти лопатей (BPF) і підвищити ефективність гвинта.

– Монтаж і кріплення суднових механізмів. Слід приділити увагу правильному використанню віброізоляційних кріплень, а також поліпшенню динамічного балансування поршневих і обертових механізмів. Віброізолювальні опори можуть знизити вібрацію від обладнання до опори та зменшити корпусний шум. У зв'язку з рухом і передачею тяги розташування пружних опор двигуна можна розглядати в основному для чотиритактних двигунів. У двотактних двигунах не можна використовувати пружні опори, тому що тяга гребного гвинта передається двигуном безпосередньо на судно.

Особливий інтерес представляє вивчення впливу крену та диференту судна на розповсюдження акустичних шумів.

Математичні залежності, які оглядаються у даній роботі, враховують фізичні властивості судна, його рух та характеристики водного середовища. При побудові моделі враховуються кут крену та кут диференту як ключові параметри, які можуть впливати на процеси генерації та поширення акустичних хвиль в морі.

Введемо деякі ключові параметри та позначення:

- Кут крену (ϕ): Кут нахилу судна відносно горизонталі.
- Кут диференту (δ): Кут відхилення диференту судна відносно лінії його довготи.
- Акустичний імпеданс води (Z): Характеризує відгук води на рух судна та генерацію акустичних хвиль, це фізична характеристика, яка визначає реакцію водного середовища на проходження акустичних хвиль. Визначається за формулою:

$$Z = \rho \cdot c \quad (5)$$

де, ρ – густина води ($\text{кг}/\text{м}^3$), c – швидкість поширення звуку у воді ($\text{м}/\text{с}$). Розмірність акустичного імпедансу: $Z = \rho \cdot c = \text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{м}/\text{с} = \text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$.

- Швидкість судна (V): Швидкість руху судна відносно води.
- Амплітуда акустичних акустичного тиску (A): Міра змін тиску, пов'язана із створенням акустичного сигналу.

Математична модель може бути розроблена на базі наступних математичних та фізичних залежностей:

Генерація акустичного сигналу:

Акустичний тиск (P), пов'язаний з генерацією акустичних хвиль, може бути описаний наступною формулою:

$$P(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (6)$$

де, $P(t)$ – тиск від акустичних хвиль від часу t , A – амплітуда тиску, f – частота акустичних хвиль.

Вплив крену та диференту на акустичний імпеданс [11, с. 15–23].

Акустичний імпеданс Z може бути змінений відповідно до кутів крену та диференту:

$$Z(\phi, \delta) = Z_0 + \frac{1}{2} \rho V^2 S \left(\frac{\cos^2(\phi)}{C_0^2} + \frac{\sin^2(\delta)}{C_0^2} \right) \quad (7)$$

де, Z_0 – акустичний імпеданс води без врахування судна, ρ – густина води, S – площа перерізу судна, c_0 – швидкість звуку в воді [11, с.15-23].

Розповсюдження акустичних хвиль в морі може бути визначено рівнянням:

$$C(\phi, \delta) = C_0 + \Delta C \cdot \cos^2(\phi) \cdot \sin(\delta) \quad (8)$$

де, $c(\phi, \delta)$ – швидкість поширення акустичних хвиль, що залежить від кутів крену та диференту,

c_0 – швидкість поширення акустичних хвиль в воді без впливу кутів крену та диференту,

Δc – зміна швидкості поширення акустичних хвиль [11, с. 15–23].

Це загальні математичні та фізичні залежності, які можуть служити основою для докладного аналізу та числового моделювання впливу крену та диференту судна на розповсюдження акустичних шумів у морській транспортній системі. У конкретних випадках можуть бути введені додаткові параметри та модифікації для врахування конкретних характеристик судна та особливостей дослідження.

Підходи та методи зменшення структурного шуму.

Структурний шум на морських судах виникає внаслідок механічних коливань та взаємодії різних елементів конструкції судна з водою. Зменшення цього шуму є важливою задачею для забезпечення комфорту для екіпажу, оптимізації роботи обладнання та мінімізації впливу на морське середовище [7, с. 15–21].

Розглянемо декілька методів зниження структурного шуму на судах:

– використання ізоляційних систем для відокремлення структур судна від джерела шуму. Активні системи можуть використовувати сенсори та контрольовані сили для ефективного управління вібраціями [8, с. 112–119].

– створення спеціальних гідроакустичних оболонок для зменшення шуму, що генерується водною динамікою та взаємодією корпусу судна з водою.

– оптимізація форми корпусу та використання віброізоляційних матеріалів для зменшення вібрацій та передачі шуму від судового обладнання.

З метою зниження рівня структурного шуму на судах використовуються методи вібродіагностики та параметричної діагностики, які дозволяють виявити несправності машин і механізмів на ранній стадії.

Існує загальний підхід до оцінки технічного стану машин за результатами вібрації на частинах, що не обертаються (ISO 10816). Згідно з вимогами, діагностика

технічного стану проводиться в залежності від класу механізму за загальним рівнем вібрації. Для аналізу береться середньоквадратичне (RMS) значення віброшвидкості механізму в діапазоні частот 10 – 1000 Гц [5, с. 75–79].

Для неперервного сигналу $V(t)$ середньоквадратичне значення визначається як:

$$\tilde{v}_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} \quad (9)$$

де T – період вибірки, який повинен бути значно більшим за період будь-якого з основних аналізованих частотних сигналів, що містяться в $V(t)$ (мінімум у 20 разів). Якщо сигнал вібрації записаний дискретно і є N значень віброшвидкості V_i , то середньоквадратичне значення визначається як :

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^2} \quad (10)$$

При обчисленні СКЗ за часовим сигналом необхідно застосувати аналогові фільтри для виділення потрібного частотного діапазону 10 – 1000 Гц. Пропонується обчислювати V_{RMS} за амплітудою спектра сигналу s_j , що базується на застосуванні теореми Парсеваля для переходу від часової області до частотної.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{j=k1}^{k2} s_j^2} \quad (11)$$

де, $k1$ і $k2$ індекси гармонік на 10 Гц і 1000 Гц відповідно. Розрахувавши V_{RMS} , можна оцінити загальний технічний стан механізму за Таблицею 1, де вказані межі віброшвидкості для нормального (А) та ненормального (В, С, D) станів механізмів різних класів [5, с. 74–79].

Таблиця 1

ISO 10816 Межі зон* RMS віброшвидкості для машин різних класів [5, с. 76]

Середньоквадратичне значення, RMS віброшвидкості, мм/с	до 15 кВт клас 1	15–75 кВт клас 2	>75 кВт (жорсткий) клас 3	>75 кВт (м'який) клас 4
0.28	A	A	A	A
0.45				
0.71				
1.12	B	B	B	B
1.8				
2.8	C	C	C	C
4.5				
7.1				
11.2	D	D	D	D
18				
28				
45				

*А – гарний стан; В – задовільний стан; С – незадовільний стан; D – аварійний стан, експлуатація небезпечна.

Однією з ключових причин структурного шуму є підвищення нерівномірності обертання колінчастого валу ГД, спричинена низкою технічних і експлуатаційних факторів.

В умовах експлуатації крутний момент на колінчастому валу змінюється в залежності від циклу роботи. Ці процеси відбуваються нерівномірно через різницю у компресії циліндрів, несвоєчасну подачу палива, змінне навантаження на двигун в умовах експлуатації. Це приводить до коливань швидкості обертання колінчастого валу. Це явище не лише впливає на механічну стійкість двигуна, а й сприяє значним втратам енергії через вібрації.

Підвищення нерівномірності обертання колінчастого валу судових дизельних двигунів може суттєво впливати на рівень вібрацій судна. Зокрема, періодичні зміни обертального моменту протягом робочого циклу двигуна призводять до коливань кутової швидкості колінчастого валу, що спричиняє вібрації. Мінливість кутової швидкості обертання колінчастого вала двигуна і машинно-рухомого комплексу, оцінюється ступенем нерівномірності обертання δ_{rot} :

$$\delta_{rot} = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\omega_{\bar{n}}}, \quad (12)$$

$$\omega_{\bar{n}} = (\omega_{max} + \omega_{min})/2, \quad (13)$$

де ω_{max} та ω_{min} – максимальна та мінімальна кутові швидкості колінчастого валу відповідно, а ω_{cp} – середня кутова швидкість, [10, с. 290].

Взявши за основу експериментально-аналітичний метод проф. Фоміна Ю. Я., можливо провести розрахунок ступеня нерівномірності обертання ДГ на різних режимах. Для цього треба розрахувати значення основних параметрів робочого процесу, що відповідають даному режиму: середній ефективний тиск (P_e), потужність двигуна (N_e), коефіцієнт надлишку повітря ($\alpha\Sigma$), температуру випускних газів (t_g). Значення тиску згорання (P_z) та тиску наддуву (P_k) визначають по результатам морських ходових випробувань. Для судових двигунів, що працюють на гребний гвинт, орієнтовне значення ступеня нерівномірності обертання (під час роботи двигуна на режимі номінальної потужності) має бути в межах 0,02-0,05 [10, с.289-290]. Погіршення технічного стану СЕУ, а також нерівномірне навантаження на двигун суттєво збільшують значення ступеня нерівномірності обертання аж до 0,12–0,14.

Підвищення нерівномірності обертання колінчастого валу безпосередньо впливає на рівень вібрацій, які передаються через корпус судна, створюючи додатковий шумовий вплив на навколишнє середовище.

Це явище посилюється в умовах крену та диференту, які змінюють розподіл навантажень і робочі параметри механічних систем. Крен і диферент спричиняють нерівномірний розподіл мастила та палива, що викликає нерівномірне згорання у циліндрах двигуна. Зокрема, у двигунах з низькою компресією або при недостатньому мастилі знижується стабільність роботи. Крім того, збільшені навантаження на деякі циліндри створюють дисбаланс у роботі двигуна, який може супроводжуватись циклічними деформаціями корпусу. Це явище ускладнюється,

коли крен збільшує торсійні коливання, які, у свою чергу, можуть співпадати з резонансними частотами корпусу, посилюючи структурний шум.

Гравітаційні ефекти також відіграють важливу роль, змінюючи потоки мастила та повітря, створюючи нерівномірності у роботі циліндрів, що веде до додаткового структурного шуму.

Торсійні коливання, які виникають через змінне навантаження, можуть збігатися з резонансними частотами механічних елементів, що посилює шум і створює додаткові технічні складнощі.

Практичні наслідки таких процесів охоплюють широкий спектр проблем. Підвищені вібрації спричиняють швидке зношення компонентів двигуна, таких як підшипники, опори вала та елементи кривошипно-шатунного механізму.

Для мінімізації цих явищ важливо застосовувати комплексний підхід, який включає технічні, експлуатаційні та управлінські рішення. Наприклад, модернізація систем подачі мастила та палива з урахуванням умов крену дозволяє забезпечити рівномірність роботи циліндрів і знизити рівень вібрацій. Вдосконалення геометрії колінчастого валу та використання демпферів вібрацій дозволяє значно зменшити торсійні коливання.

Згідно з останніми експериментальними дослідженнями спектрального розподілу рівнів звукового тиску (SPL), отриманими через гідрофони, встановлено, що найбільші рівні підводного звукового тиску поширюються в діапазоні частот від 10 Гц до 1 кГц. [9, с. 45–50] Цей діапазон в основному обумовлений вібрацією конструкцій судна, головних двигунів та дизель-генераторів, які резонують на частотах, кратних основній частоті обертання, а також гідроакустичним випромінюванням гребного гвинта. Враховуючи властивості поширення низькочастотних акустичних хвиль, можна стверджувати, що існує тісний зв'язок між параметрами структурного шуму та підводного шуму (URN).

Авторські результати дослідження. Автором пропонується проведення наукових досліджень з метою подальшої розробки інтелектуальної системи моніторингу, яка забезпечить аналіз параметрів вібрацій судових двигунів, акустичного шуму та рівня підвищення нерівномірності обертання колінчастого валу головного двигуна (ГД) в реальному часі. Аналіз цих даних може дозволити оптимізувати режими роботи двигунів, зменшити показники нерівномірності обертання колінчастого валу ГД за рахунок корекції одного або декількох параметрів, таких як швидкість, курс, крен та диферент судна. Такі заходи дозволять понизити рівень структурного шуму і як наслідок рівня гідроакустичного шуму. Рекомендації по зміні значень цих параметрів можуть формуватися за результатами ходових випробувань окремо для кожного судна.

Також актуальними на думку автора є такі інженерні рішення, як модернізація систем змащування та подачі палива, які адаптуються до умов крену та диференту судна, забезпечуючи рівномірне постачання мастила та палива до всіх циліндрів двигуна. Це дозволяє досягти стабільності роботи циліндрів, що значно знижує коливання крутного моменту і пов'язані з цим акустичні ефекти. Така адаптація базується на використанні технологій активного контролю потоку, які регулюються автоматизованими модулями в залежності від положення судна.

Висновки. Зниження структурного шуму на судах є критичною задачею сучасної морської інженерії, що потребує комплексного підходу, який поєднує

інноваційні технології, інженерні рішення та оптимізацію експлуатаційних параметрів. Впровадження сучасних шумоізоляційних матеріалів, зокрема багатослоєвих композитів з високими демпфуючими властивостями, дозволяє суттєво знизити рівень передачі шуму від механізмів судна до його корпусу. Це не лише сприяє покращенню умов роботи екіпажу, а й мінімізує акустичний вплив на морське середовище, що є важливим з огляду на глобальні екологічні вимоги.

Використання активних та пасивних демпферних систем у поєднанні з вібродіагностикою, методом визначення зміни показника нерівномірності обертання колінчастого валу ГД та ДГ у реальному часі та його зменшення дозволить не лише зменшити інтенсивність шумових коливань, а й своєчасно виявляти потенційні джерела підвищених вібрацій і акустичного шуму, які негативно впливають на довговічність конструкції судна та ефективність його експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. ISO 17208-1:2016. Underwater acoustics—Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships. 2016.
2. Buszman, K. Analysing the impact on underwater noise of changes to the parameters of a ship's. *Polish Marit. Res.*, 2020. Vol. 27, No. 3, pp. 176–181. <https://doi.org/10.2478/pomr-2020-0054>.
3. МЕРС.1/Circ.833 7 April 2014 Guidelines for the reduction of underwater noise from commercial shipping to address adverse impacts on marine life.
4. International Maritime Organization [ИМО]. Res. A.468(XII) code on noise levels on board ships. London (UK). 1981.
5. Варбанець, Р.А., Кучеренко, Ю.М., Кирнац, В.І. Аналіз можливості вібродіагностики технічного стану суднових дизелів. *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. Науково-технічний журнал. Харків: Національний аерокосмічний університет ім. Н.С. Жуковського "ХАІ". 2014. №6 (113). С. 74–79.
6. NOAA Fisheries. Ocean Noise and Marine Life. [Electronic resource]. Access mode: <https://www.fisheries.noaa.gov/national/science-data/ocean-noise-and-marine-life>.
7. Попов, О.П., Васильєв, С.М. Методи зниження акустичного шуму суден. *Вісник Національного технічного університету України "КПІ". Серія: Суднобудування*. 2020. № 3. С. 15–21.
8. Коваленко, І.В., Марченко, Ю.П. Аналіз акустичного впливу морського транспорту на довкілля. *Морський екологічний журнал*. 2021. Т. 1, № 2. С. 112–119.
9. Павленко, Л.Г., Іванова, О.А. Використання гідрофонів для моніторингу акустичного шуму в морському середовищі. *Вісник Харківського національного університету. Серія: Екологія*. 2019. № 8. С. 45–50.
10. Суднові двигуни внутрішнього згоряння / Ю. Я. Фомін, А. І. Горбань та ін. – Л.: Суднобудування, 1989. – 344 с.
11. Grelowska, G., Witos-Okrasińska, D. Influence of natural conditions on the imaging of the bottom of the Gdańsk Bay by means of the side scan sonar. *Polish Maritime Research*. 2018. Vol. 25, No. 3. P. 15–23. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2018-0030>.

REFERENCES

1. ISO 17208-1:2016. (2016). *Underwater acoustics—Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships*.
2. Buszman, K. (2020). Analysing the impact on underwater noise of changes to the parameters of a ship's. *Polish Maritime Research*, 27(3), 176–181. <https://doi.org/10.2478/pomr-2020-0054>
3. MEPC.1/Circ.833 7 April 2014 Guidelines for the reduction of underwater noise from commercial shipping to address adverse impacts on marine life.
4. International Maritime Organization [IMO]. (1981). *Res. A.468(XII) code on noise levels on board ships*. London (UK).
5. Varbanets, R.A., Kucherenko, Y.M., & Kyrnats, V.I. (2014). Analysis of the possibility of vibration diagnostics of technical condition of ship diesel engines [Analiz mozhyvosti vibrodiagnostyky tekhnichnoho stanu sudnovykh dyzeliv]. *Aviation and Space Technology*, 6(113), 74–79 [in Ukrainian].
6. NOAA Fisheries. (n.d.). *Ocean Noise and Marine Life*. Retrieved from <https://www.fisheries.noaa.gov/national/science-data/ocean-noise-and-marine-life>.
7. Popov, O.P., & Vasiliev, S.M. (2020). Methods of reducing acoustic noise of ships [Metody znyzhennia akustychnoho shumu suden]. *Bulletin of NTUU KPI. Series: Shipbuilding*, 3, 15–21 [in Ukrainian].
8. Kovalenko, I.V., & Marchenko, Y.P. (2021). Analysis of the acoustic impact of marine transport on the environment [Analiz akustychnoho vplyvu morskoho transportu na dovkillia]. *Marine Ecological Journal*, 1(2), 112–119 [in Ukrainian].
9. Pavlenko, L.G., & Ivanova, O.A. (2019). Use of hydrophones for monitoring acoustic noise in the marine environment [Vykorystannia hidrofoniv dlia monitorynhu akustychnoho shumu v morskomu seredovyschi]. *Bulletin of Kharkiv National University. Series: Ecology*, 8, 45–50 [in Ukrainian].
10. Fomin, Y.Y., Horban, A.I., et al. (1989). *Marine Internal Combustion Engines [Sudovi dvuhuny vnutrishnoho zghorannia]*. Lviv: Sudnobuduvannia [in Ukrainian].
11. Grelowska, G., & Witos-Okrasińska, D. (2018). Influence of natural conditions on the imaging of the bottom of the Gdańsk Bay by means of the side scan sonar. *Polish Maritime Research*, 25(3), 15–23. <https://doi.org/10.2478/pomr-2018-0030>

ANALYSIS OF MODERN METHODS FOR ENSURING LUBRICATION OF THE CYLINDER-PISTON GROUP

O.V. Semenov¹, S.A. Karianskyi²

Technical advisor,

¹Consulting and technical support company Seminventions LLC, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0002-6941-3500

PhD, Associate Professor, Chartered Engineer, Chair,

²Institute of Marine Engineering, Science and Technology (United Kingdom),
Odesa Branch, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-0951-6516

Summary

Introduction. Recently, new systems have appeared on marine engines cylinder liner lubricants from different manufacturers. World leaders the following manufacturers are involved in the production of these systems: Wärtsilä Retrofit pulse lubrication system (RPLS); MAN B&W Lubrication engine control system (LUBECS) and Hans Jansen. Major innovations and technical developments in cylinder systems lubricants boil down to the following: saving cylinder oil; reduction of wear of cylinder liners; – reducing the risk of cold corrosion of cylinder liners; maximum possible operating time in “Slows teaming” mode and “Extra Slow steaming” (mode of long-term operation of ship engines on low loads 50% MCR and ultra-low loads from 10% to 50% MCR). **Purpose.** Analysis of the approaches of the above-mentioned manufacturers to solving problems of high-quality functioning of cylinder lubrication systems allows us to trace current trends in ensuring optimal lubrication regimes for modern marine diesel engines with increased piston stroke. Solving these problems (according to ship tests of the manufacturers in question) leads to a reduction in cylinder oil consumption by approximately two times. **Results.** Overview of cylinder oil injection systems into the cylinder; determination of the approaches of a well-known manufacturer of lubrication systems and the difference in supply principles, designed for training ship mechanics – understanding the differences and features of lubrication systems in modern operating conditions (different types of engines, manufacturers, and differences in classes of ships) will help to avoid breakdowns of main engines and financial losses for shipowners. **Conclusions.** We will consider the methods by which these problems are solved and the assigned tasks are solved in this article.

Key words: cylinder liner; lubricants; marine engines.

АНАЛІЗ, СУЧАСНИХ СПОСОБІВ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ЗМАЩУВАННЯ ЦИЛІНДРОПОРШНЕВОЇ ГРУПИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

О.В. Семенов¹, С.А. Кар'янський²

технічний консультант,

¹Компанія консалтингу та технічної підтримки Seminventions LLC,
Одеса, Україна,

ORCID ID: 0009-0002-6941-3500

к.т.н., доцент, чартерний інженер, голова,

²Інституту морської техніки, науки і технології (Сполучене Королівство),

Одеське відділення, Одеса, Україна,

ORCID ID: 0000-0003-0951-6516

Анотація

Вступ. Останнім часом з'явилися нові системи змащення для циліндрових втулок суднових двигунів від різних виробників. Світовими лідерами у виробництві даних систем є такі виробники: Wärtsilä Retrofit pulse lubrication system (RPLS), MAN B&W Lubrication engine control system (LUBECS) та Hans Jansen. Основні інновації та технічні розробки в циліндрових системах змащення зводяться до наступного: економія циліндрового масла; зменшення зносу циліндрових втулок; зменшення ризику холодної корозії циліндрів; максимально можливий час роботи в режимах «Slows teaming» та «Extra Slow steaming» (режим тривалої роботи суднових двигунів на малих навантаженнях 50% MCR і наднизьких навантаженнях від 10% до 50% MCR). **Мета.** Аналіз підходів вищезазначених виробників до вирішення завдань якісного функціонування систем змащення циліндрів дозволяє простежити сучасні тенденції щодо забезпечення оптимальних режимів змащення сучасних суднових дизельних двигунів із збільшеним ходом поршня. Вирішення цих проблем (за судновими випробуваннями розглянутих виробників) призводить до зниження витрати циліндрового масла приблизно в два рази. **Результати.** Огляд систем впорскування циліндрового масла до циліндру, визначення підходів відомого виробника систем змащення та різниця в принципах подачі, крім того розуміння відмінностей та особливостей систем змащення в сучасних умовах експлуатації (різні типи суднових дизельних двигунів, виробників, а також відмінності в класах суден) допоможуть уникнути поломок головних двигунів і фінансових втрат для судновласників. **Висновки.** Проаналізувавши всі сучасні конструктивні рішення та інженерні підходи виробників суднових двигунів, а також особистий досвід – були сформульовані загальні рекомендації щодо оптимізації процесів змащення циліндропоршневої групи та методи вирішення цих проблем.

Ключові слова: втулка циліндра; мастило; суднові двигуни.

Introduction. The new systems have been designed on marine engines cylinder liner lubricants from different manufacturers in order to minimize oil consumption, decrease level of wear and damage to marine engines and reduce the economic losses of the ship-owners. The following well-known leading manufacturers such as Wärtsilä RPLS; MAN B&W LUBECS; Hans Jansen are involved in the production of these systems concerned in this paper.

Most of the projects and technical improvements in cylinder systems lubricants may be determined as the following: saving cylinder oil; reduction of wear of cylinder liners; reducing the risk of cold corrosion of cylinder liners; maximum possible operating time in “Slow steaming” mode and “Extra Slow steaming” (mode of long-term operation of ship engines on low loads 50% MCR and ultra-low loads from 10% to 50% MCR).

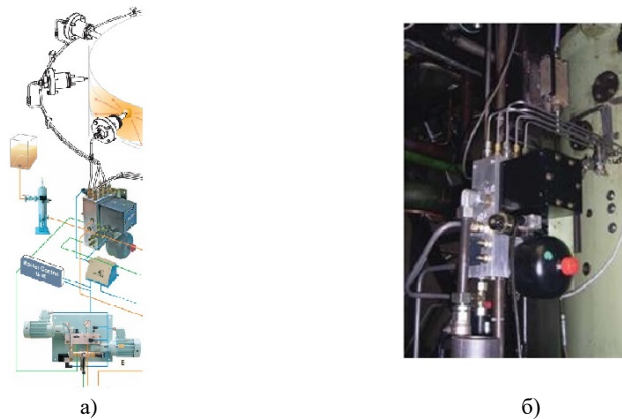
Modern operating conditions of ship engines require highly qualified and experienced engineering staff who are ready to respond to any deficiency or trouble-shooting matter. If problems arise during operation with the condition of the cylinder-piston group, the manufacturer should be aware of the problems concerned with his products in order to take all possible measures and actions to prevent and stop the process of deterioration of the engine condition.

The present work makes ample use of the maritime experience and test trials conducted on board of M/V “Primerose” and APL “Salalah”. The results of this practical research were systematized and clearly illustrated in the figures given in the previously published scientific work [23]. The theoretical background and practical references to manuals for engine room department were widely used while preparing this paper. The results of this research will be useful for training and upgrading the knowledge of future and active marine engineers.

1. Analysis of modern cylinder lubrication systems for marine diesel engines be Wärtsilä RPLS, MAN B&W LUBECS and Hans Jansen.

1.1 The main design solutions developed by Wärtsilä regarding the lubrication of the cylinder-piston group of diesel engines come down to the following points.

The RPLS system for supplying cylinder oil through high pressure quills (non-return valves) is shown in Figure 1 [24, 25] and includes a separate hydraulic oil system to operate the hydraulic actuator using a solenoid valve (Figure 2) [24, 25].



*Fig. 1. System for supplying cylinder oil to parts of the Wärtsilä cylinder-piston group:
a) general layout of the system; b) installation diagram on a diesel engine*

In addition, the RPLS system includes system for determining the position of the engine crankshaft and injecting oil at exactly specified moment considering the crankshaft speed, load and a given feed (set by the processor).

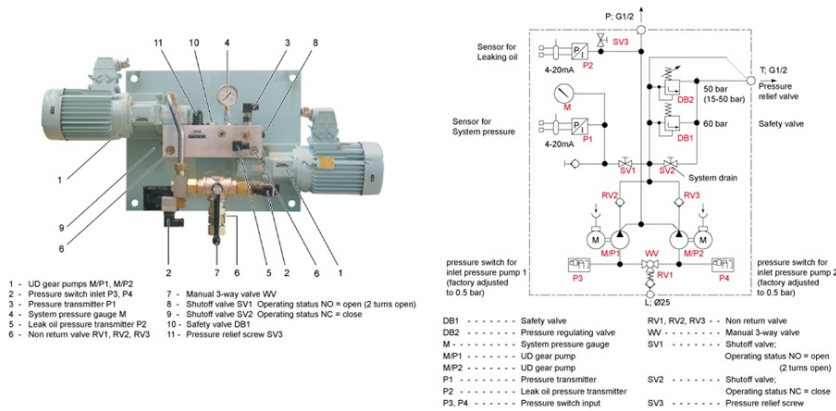


Fig. 2. Functional structure of the hydraulic oil system

1.2 Engineering and design solutions from MAN B&W LUBECS.

The LUBECS system developed by MAN B&W supplies cylinder oil through non-return valves under high pressure by injecting at each control point with plungers driven by hydraulic oil from a signal solenoid valve to a cylinder lubricator installed on each cylinder.

The cylinder lubricator is industrially installed on the hydraulic cylinder control unit (HCU) which does not require a separate control and monitoring system (additional processors) and is built into the main control panel system (MOP). The MAN B&W hydraulic control unit is shown in Figure 3 [8].

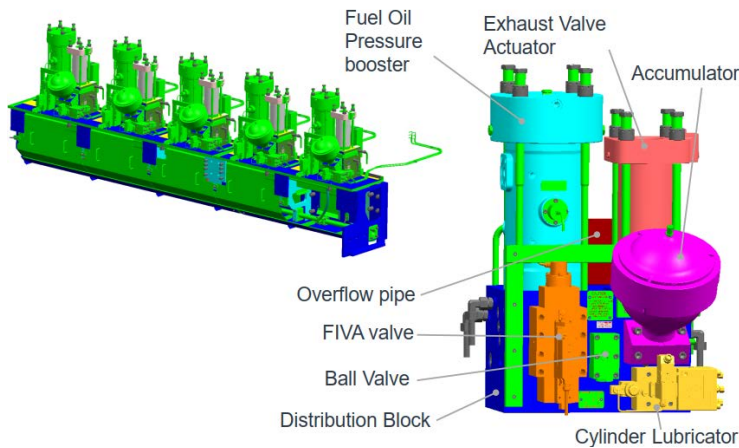


Fig. 3. Complete set of hydraulic control unit for cylinder lubrication system LUBECS from MAN B&W

Oil is supplied to the diesel cylinder by a lubricator the diagram of which is shown in Figure 4 [3].

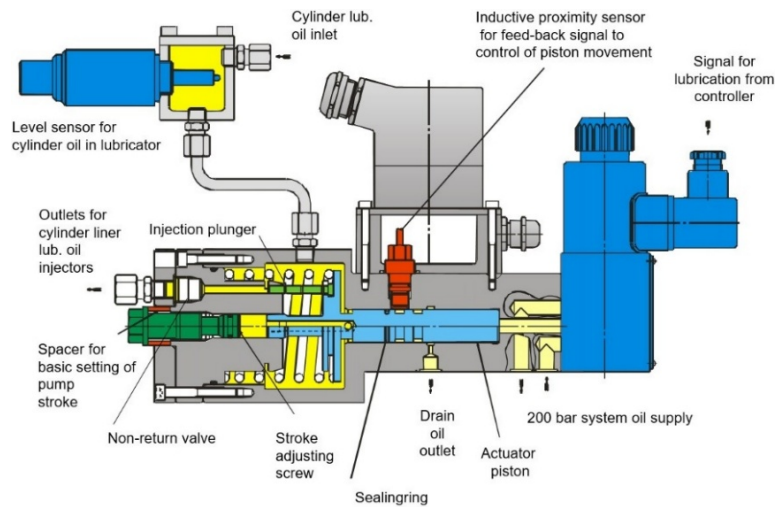


Fig. 4. Lubricator for lubrication system LUBECS from MAN B&W

1.3. Engineering and design solutions from Hans Jensen

This system was tested by one of the container shipping companies. According to the agreement with the shipowner, the functional components of this system have been installed on new ships since summer 2014.

The Hans Jensen lubrication system traditionally supplies cylinder oil through non-return valves under high pressure, while the cylinder oil is supplied to the space above the piston but not to the piston rings, up to the cylinder liners with swirling cylinder oil flows (SWIRL principle). The Hans Jensen lubricator is shown in Figure 5 [4].



Fig. 5. Lubricator from Hans Jensen

2. Analysis of general solutions in the cylinder liners lubrication.

Currently, leading manufacturers of marine engines are intensively developing lubrication systems for cylinder-piston groups largely based on their engineering innovations considering the experience of operating marine diesel engines in marine conditions. Systems for monitoring and adjusting the cylinder oil supply are constantly

and regularly updated (via software) and the companies constantly monitor compliance with these requirements.

Analysis of cylinder lubrication systems by Wärtsilä (RPLS), MAN B&W (LUBECS), Hans Jensen gives the opportunity to witness the progress of engineering concept of system developed and resorts to identifying common solutions and trends in systems:

- installation of non-return valves before inlet of cylinder oil to the cylinder;
- use of a hydraulic drive system (hydraulic actuator) of dosing pumps (Lubricators Hydraulic Units);
- ensuring accurate injection of cylinder oil into exactly specified torque by the Central Processor (Controller) considering the speed, engine load and the amount of oil designated for each system (mandatory includes a crankshaft position sensor);
- ensuring cylinder oil savings by skipping piston strokes (except for Hans Jensen systems under development).

3. Analysis of peculiarities and principles in providing lubrication of cylinder-piston elements group.

3.1 Wärtsilä (RPLS) strategy

The RPLS cylinder lubrication system developed by Wärtsilä solves the following problems:

- injection direction control;
- injection of cylinder oil at precisely specified time by processor considering the position of the cylinder rings at the ratio: 40% – top rings; 40% – bottom rings and 20% piston skirt.

The direction of cylinder oil injection is demonstrated in Figure 6. Savings are achieved by skipping piston strokes. According to tests on a steamship the description does not register more than 6 piston strokes in case of light loads, that is the established minimum consumption g/(gKWh) per number of piston strokes (mandatory injection). The minimum declared cylinder oil consumption is 0.8 g/(gKWh).



Fig. 6. RPLS cylinder oil injection direction

3.2 MAN B&W strategy

The LUBECS cylinder lubrication system developed by MAN B&W as well as Wärtsilä solves the same problems in a similar way: injection of cylinder oil at exactly specified time by the processor without precise distribution to the upper and lower rings of the piston. The injection direction is shown in Figure 7 [3].

Savings are achieved by skipping piston strokes (no more than 12 piston strokes in case of light loads, i.e. the established minimum flow rate g/(kWh) which is mandatory injection). The minimum declared cylinder oil consumption is 0.6 g/(KWh).

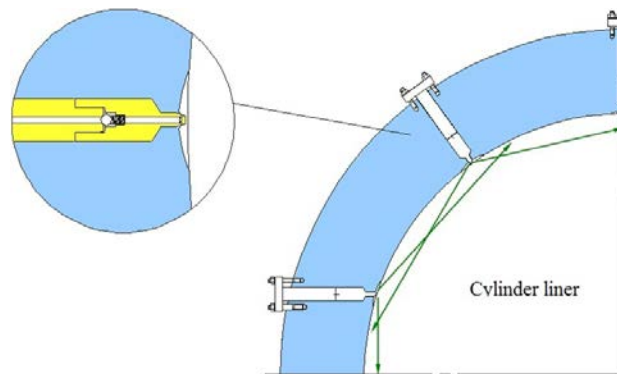


Fig. 7. Cylinder oil injection direction of the LUBECS system

3.3 Hans Jensen strategy

Hans Jensen's latest cylinder lubrication system developed and tested in 2013 and launched in 2014 runs different route in providing cylinder liner lubrication. The basic principle is that cylinder oil injection occurs at each stroke of the piston and cylinder oil flows above the piston onto the cylinder liner with swirling flow of the injected cylinder oil (SWIRL principle) using non-return valves under high pressure hydraulic system and additional air charge impulse. The injection direction is presented in Figure 8.

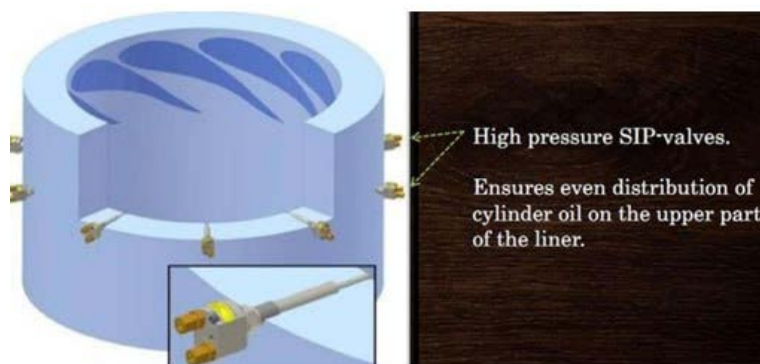


Fig. 8. Hans Jensen cylinder oil injection direction

Figure 9 shows the surface covered with an oil film on traditional cylinder lubrication system, and in Figure 10 from Hans Jensen.

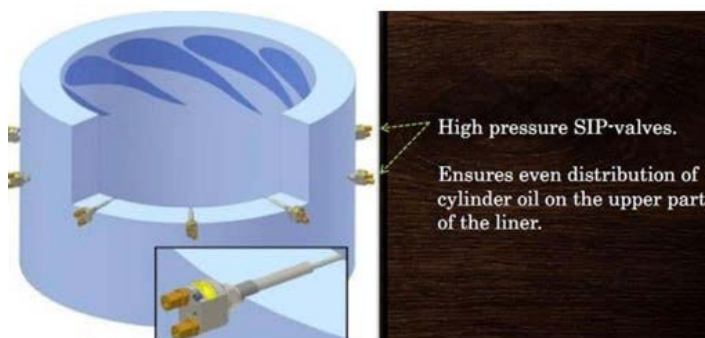


Fig. 9. Surface covered by an oil film on a traditional cylinder lubrication system

Fig. 10. Surface covered by an oil film on the system Hans Jensen cylinder lubricant

The declared cylinder oil consumption is shown in Figure 11 according to the results of tests on the M/V "Primrose" and one has to admit that comparison was made with the old mechanical lubricator system.

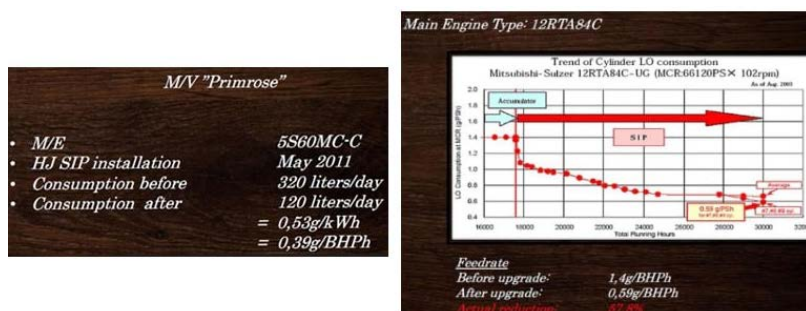


Fig. 11. Cylinder oil consumption during test trials of the m/v "Primrose"

4. “Slow steaming” mode (long-term operation mode at low load of marine engines) and recommendations from manufacturers Wärtsilä and MAN B&W.

Due to economic reasons marine engine manufacturers are aimed at achieving trouble-free operation under (50% MCR) and ultra-light (<50% MCR) load operating conditions of marine engines to reduce fuel consumption and maximum decrease of the cylinder oil consumption.

Low load conditions on WÄRTSILÄ engines led to the following problems of the cylinder-piston group:

- cold corrosion of cylinder liners;
- increased wear of cylinder liners and damage to cylinder rings; unfortunately, it should be noted that the loss of one bushing on this engine has its own feature – in the event of failure to replace the problematic cylinder liners being detected in time leads to the loss of half of the engine cylinder liners (as there is not enough time for replacement due to the ship’s schedule or any other reasons).

An example of damage to cylinder rings on 12RT-Flex 96C engine is shown in Figure 12.



Fig. 12. Example of damage to cylinder rings on an engine

Wärtsilä currently makes the following recommendations to solve these problems:

- continuous inspections of piston rings and cylinder liners;
- at least once every three days increasing the load to 70% MCR and more, for a period of one-two hours to get rid of solid deposits and unburned fuel residues will be carried out (the load should be increased gradually);
- replacement of the cylinder lubrication system with an RPLS system;
- installation of the MAPEX system (Monitoring & Maintenance, Performance, Enhancement with Expert Knowledge).

The MAPEX system determines in real time:

- a) Monitoring the stability of the cylinder oil film cylinder liners.
- b) Alarm activation in case of local overheating of the cylinder liners.
- c) Monitoring of cooling water temperature and alarm activation in case of parameters exceeding the set modes.
- d) Informing in case of failure of one or more injectors.
- e) Monitoring the temperature of the air charge and signaling in case of exit from the established modes.

Figure 13 shows examples of real-time temperature readings for cylinder liners, cooling water and air charge.

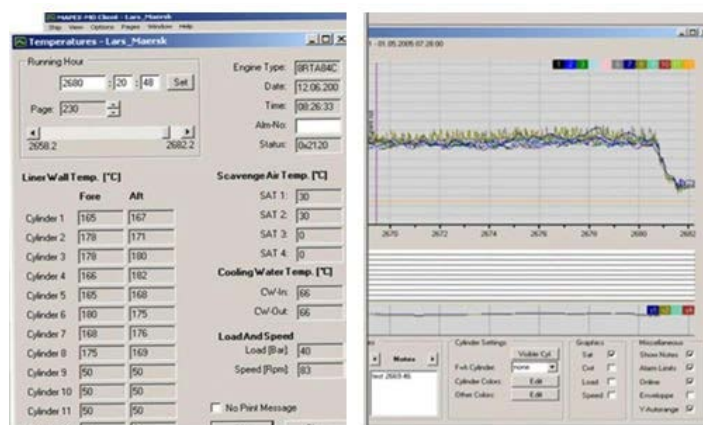


Fig. 13. Example of temperature readings of cylinder liners, cooling water, air charge in real time of the MAPEX system

Figure 14 shows examples of notifications about parameters of the MAPEX system going beyond acceptable limits.



Fig. 14. Example of signaling in the MAPEX system

Problems considered in light load modes of marine diesel engines identified by MAN B&W:

- cold corrosion of cylinder liners (especially long-stroke engines)

Figure 15 [1] shows an example of cold corrosion of cylinder liner on S50ME-B9.2 engine.



Fig. 15. Example of cold corrosion of an engine cylinder liner

- partial removal of metal in the locks and damage to the piston rings and damage to the cylinder rings.

Figure 16 shows an example of cylinder ring damage on an S80ME-C9 engine.



Fig. 16. An example of damage to cylinder rings on an S80ME-C9 engine

According to service bulletins and operating experience of MAN B&W engines, the following recommendations have been suggested:

- continuous inspections of piston rings and cylinder liners;
- at least once every two days increase the load to 50% MCR and more, for a period of one-two hours to get rid of solid deposits and unburned fuel residues should be carried out (the load has to be increased gradually, an example is shown in Figure 17);
- replacement of cylinder lubrication systems with LUBECS system;
- pay special attention to the adaptive cylinder oil control (ACC) factor in settings and adjustments of the supply of cylinder oil to the cylinder liners. The ratio of the metal coefficient and base number (BN) in the analysis of oil taken from the underside piston space. Figure 18 [10] shows the dependence of the metal level on BN and the recommended safe work zones according to the analysis readings.

Manual load-up procedure	Duration
Load up, 10 → 40% load	30 minutes
Load up, 40 → 75% load	60 minutes (SL08-501)

Fig. 17. Recommended loading time characteristics

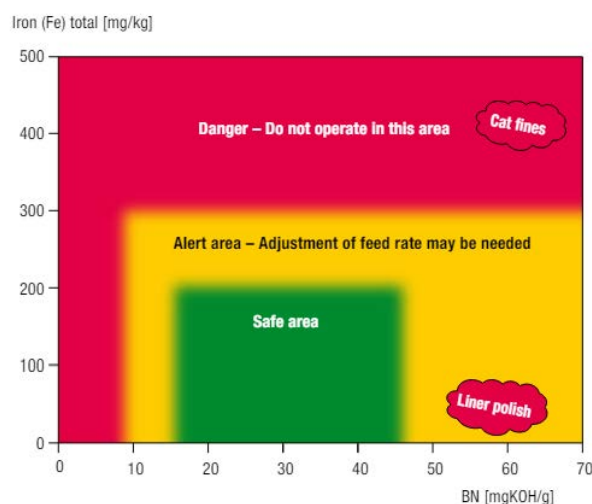


Fig. 18. Dependence of the metal level on BN and recommended safe work zones based on analysis readings taken in the underside piston spaces

Recommended oil consumption is calculated using the formula:

$$ACC \times S = FR$$

where: ACC – 0.2-0.35 – is set experimentally after determining the metal coefficient and BN in the analysis of oil taken from the underside piston space; S-sulfur (the amount of sulfur in the fuel %); FR – feed rate (recommended oil consumption g/(KWh)).

At the same time, it must be considered that the recommended oil consumption should not be lower than 0.6 g/(KWh) (the LUBECS system will automatically set the consumption to at least 0.6 g/(KWh)).

It should be noted that the manufacturer MAN B&W recommends changing the cylinder lubricant to a TBN factor of 100 for long-stroke engines.

In order to combat cold corrosion of cylinder liners MAN B&W has developed a new cooling system for cylinder liners.

It is a 4-pipe cooling system for cylinder liners (G-type engines and future generations Mark 9). Figure 19 [1] shows the general layout of the new cooling system installed on the engine.

The system consists of two additional cooling water pipes along the entire engine and additional pump and control valve that controls the sleeve cooling water temperature reaching 120°C and maintaining the temperature of the cylinder cover and exhaust valve at 80-90°C. The high temperature of the cylinder liner is maintained only in low load modes of the marine engine.

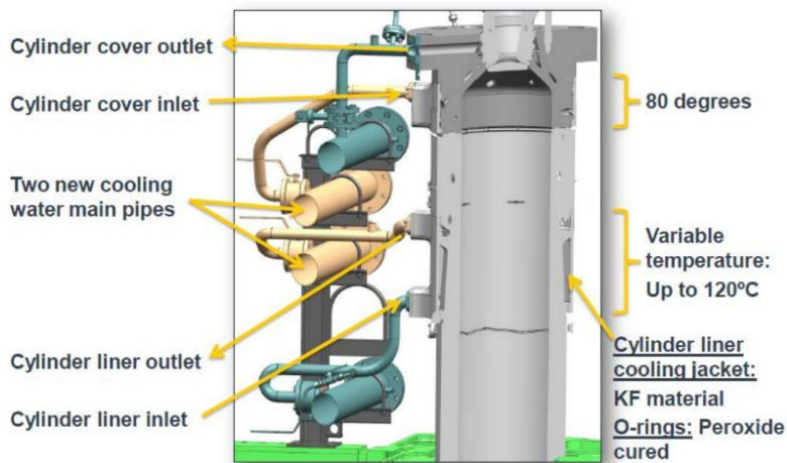


Fig. 19. General layout of new MAN B&W cooling system

Conclusion. General recommendations for optimizing processes of lubrication of the cylinder-piston group of marine diesel engines. Having analyzed all the design solutions and engineering approaches of marine engine manufacturers, general recommendations for optimizing the lubrication processes of the cylinder-piston group may be defined as the following:

- continuous inspection of cylinder rings and cylinder liners;
- increase in the operating temperature of the cooling water behind the jacket space by 5–10°C of cylinder liners (within the limits allowed by the manufacturer);
- at least once every two days increasing the load to 50% MCR (70% MCR) and more, for a period of one-two hours to get rid of unburnt fuel residues (the load increase should be done gradually);
- constant control over the amount of cylinder oil supply when switching to fuels with different sulfur content. Adjustment should be carried out from a higher feed rate to a smaller one gradually with constant inspections of cylinder rings and cylinder liners and on the basis of an oil analysis in the piston underside space (MAN B&W) or MAPEX (Wärtsilä);

- quality control of fuel atomization (injectors);
- control of load distribution across cylinders.

Modern operating conditions of ship engines require highly qualified and experienced engineering teams. If problems arise during operation with the condition of the cylinder-piston group, the Chief Engineer is obliged to inform the manufacturer immediately and take all possible measures and actions to prevent and stop the process of deterioration of the engine condition, with regard to the recommendations of manufacturing companies as well as personal experience.

If damage to the cylinder rings is detected on one of the cylinders or the automatic system turns off the fuel supply to one of the cylinders (for example, on RT-flex engine, when the sensor for the amount of fuel supplied to the cylinder is jammed, the automatic system turns off the fuel supply completely to this cylinder), maximum engine load should be immediately limited on MAN B&W engines to 55% MCR, RT-flex (Wärtsilä) to 70% MCR until the problem is resolved. Mind that pirate navigation areas require an increase in the ship's speed or poor navigation conditions in the navigation area cannot guarantee compliance with these recommendations and, therefore, the experience and qualifications of the Chief Engineer in these difficult conditions will play a decisive role.

BIBLIOGRAPHY

1. MAN Diesel&Turbo. Cylinder Liner Cold Corrosion Control. Marker Update Note від 3 липня 2023 р.
2. Karianskyi, S., Ozhenko, Y., & Lavruchenko, Y. Electronically Controlled WinGD RT-flex/X engines. Одеса: НУ «ОМА», 2019. 62 с. ISBN 978-966-7591-97-7.
3. Karianskyi, S., Ozhenko, Y.. Electronically Controlled MAN-B&W ME type engines. Одеса: НУ «ОМА», 2021. 92 с. ISBN 978-617-7857-06-7.
4. Hans Jensen Lubricators A/S. HJ Lubtronic 2.0 / Electronic Lubricator with cost-efficient design.
5. Hans Jensen Lubricators. Прес-реліз від 19 листопада 2022 р.
6. Hans Jensen Lubricators. Прес-реліз від 30 січня 2023 р.
7. Wärtsilä Switzerland Ltd. Service. Марех-PR (New). 21 вересня 2022 р.
8. MAN PrimeServ Academy Piraeus. ME Fundamentals and Critical Principles. 1st Classification Society Event 2017. Доступно: www.mandieselturbo.com.
9. MAN Diesel & Turbo. ME 5510-0143-00 ppr Low service experience. 2013.
10. MAN Diesel & Turbo. ME Service Experience. 2011.
11. SKF Lubrication Systems Germany GmbH. Operator manual Lubrications system CLU4. Brochure note 951-130-314-DE/-EN.
12. SKF Lubrication Systems Germany GmbH. Operator manual Lubrications system CLU4-C. Brochure note 951-170-206-DE-EN.
13. Wärtsilä Switzerland Ltd. Pulse Lubrication Operation Manual. Version a2. 17 листопада 2008 р.
14. Wärtsilä Land&Sea Academy. RT-flex Training. Function of the CLU-4 Pulse Jet Cylinder Lubrication System. Chapter 72.

15. Wärtsilä Land&Sea Academy. RTA/RT-flex Training. Function of the CLU-4 Pulse Feed Cylinder Lubrication System. Chapter 73.
16. Wärtsilä Switzerland Ltd. Retrofit Pulse Lubrication Experience. 9 вересня 2014 р.
17. SKF Lubrication Systems Germany GmbH. Spare Part list CLU4/CLU4-C. Brochure note 951-160-012-DE/-EN.
18. MAN Diesel & Turbo. Service letter SL2013-571/JAP. Cylinder lubrication update. 2013.
19. MAN Diesel & Turbo. Service letter SL09-511/MTS. Low load operation. 2009.
20. MAN Diesel & Turbo. Service Bulletin RT-flex-08. Continuous Low Load Operation. 10 вересня 2017 р.
21. MAN Diesel & Turbo. 50-108 Operation of ME Engines. Revision 03.
22. MAN Diesel & Turbo. 50-108 ME Engine Components and Maintenance. Edition 01.
23. Sagin, S. V., & Semenov, O. V. (2016). Marine slow-speed diesel engine diagnosis with view to cylinder oil specification. *American Journal of Applied Sciences*, 13(5), 618-627. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2016.618.627>
24. Grupo VEI. (n.d.). Bomba para barco [PDF document]. Retrieved from http://www.grupovei.pt/upload/Bomba_para_barco%282%29-1-03047997c4f8.pdf
25. Chernysh, I. I., Karyanskyi, S. A., & Ozhenko, Y. M. (2019). Modern marine diesel engines: Design features, operation, and automated control [Suchasni sudnovi dizeli: osoblyvosti konstruktsii, ekspluatatsii ta avtomatyzovanoho upravlinnia]. Odessa: NU "OMA". ISBN 978-966-7591-94-6.

REFERENCES

1. MAN Diesel&Turbo. (2023, July 3). Cylinder liner cold corrosion control [Marker Update Note].
2. Karianskyi, S., Ozhenko, Y., & Lavruchenko, Y. (2019). Electronically controlled WinGD RT-flex/X engines. Odessa: NU «OMA». (ISBN 978-966-7591-97-7).
3. Karianskyi, S., & Ozhenko, Y. (2021). Electronically controlled MAN-B&W ME type engines. Odessa: NU «OMA». (ISBN 978-617-7857-06-7).
4. Hans Jensen Lubricators A/S. (n.d.). HJ Lubtronic 2.0: Electronic lubricator with cost-efficient design.
5. Hans Jensen Lubricators. (2022, November 19). [Press Release].
6. Hans Jensen Lubricators. (2023, January 30). [Press Release].
7. Wärtsilä Switzerland Ltd. Service. (2022, September 21). Mapex-PR (New).
8. MAN PrimeServ Academy Piraeus. (2017). ME fundamentals and critical principles. 1st Classification Society Event. Retrieved from www.mandieselturbo.com.
9. MAN Diesel & Turbo. (2013). ME 5510-0143-00 ppr Low service experience.

10. MAN Diesel & Turbo. (2011). ME service experience.
11. SKF Lubrication Systems Germany GmbH. (n.d.). Operator manual lubrication system CLU4 (Brochure note 951-130-314-DE/-EN).
12. SKF Lubrication Systems Germany GmbH. (n.d.). Operator manual lubrication system CLU4-C (Brochure note 951-170-206-DE/-EN).
13. Wärtsilä Switzerland Ltd. (2008, November 17). Pulse lubrication operation manual (Version a2).
14. Wärtsilä Land&Sea Academy. (n.d.). RT-flex training: Function of the CLU-4 pulse jet cylinder lubrication system (Chapter 72).
15. Wärtsilä Land&Sea Academy. (n.d.). RTA/RT-flex training: Function of the CLU-4 pulse feed cylinder lubrication system (Chapter 73).
16. Wärtsilä Switzerland Ltd. (2014, September 9). Retrofit pulse lubrication experience.
17. SKF Lubrication Systems Germany GmbH. (n.d.). Spare part list CLU4/CLU4-C (Brochure note 951-160-012-DE/-EN).
18. MAN Diesel & Turbo. (2013). Service letter SL2013-571/JAP: Cylinder lubrication update.
19. MAN Diesel & Turbo. (2009). Service letter SL09-511/MTS: Low load operation.
20. MAN Diesel & Turbo. (2017, September 10). Service bulletin RT-flex-08: Continuous low load operation.
21. MAN Diesel & Turbo. (n.d.). 50-108 operation of ME engines (Revision 03).
22. MAN Diesel & Turbo. (n.d.). 50-108 ME engine components and maintenance (Edition 01).
23. Sagin, S. V., & Semenov, O. V. (2016). *Marine slow-speed diesel engine diagnosis with view to cylinder oil specification*. American Journal of Applied Sciences, 13(5), 618-627. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2016.618.627>
24. Bomba para barco [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.grupovei.pt/upload/Bomba_para_barco%282%29-1-03047997c4f8.pdf (дата звернення: 01.02.2025).
25. Черниш І. І., Кар'янський С. А., Оженко Є. М. Сучасні суднові дизелі: особливості конструкції, експлуатації та автоматизованого управління. – Одеса: НУ «ОМА», 2019. – 217 с. – ISBN 978-966-7591-94-6.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656.1:614

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2025.1-24.05>

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ МЕРЕЖ КОНТАКТІВ ПАСАЖИРІВ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ В КОНТЕКСТІ РИЗИКУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ІНФЕКЦІЙНИХ ЗАХВОРЮВАНЬ

О.Ф. Кузькін¹, І.М. Райда², Е.В. Терещенко³

¹д.т.н., професор кафедри «Транспортні технології»,
Національний університет «Запорізька політехніка»,
Запоріжжя, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-3160-1285

²старший викладач кафедри «Транспортні технології»,
Національний університет «Запорізька політехніка»,
Запоріжжя, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-3925-4692

³к.ф.-м.н., доцент кафедри «Системний аналіз та обчислювальна математика»,
Національний університет «Запорізька політехніка»,
Запоріжжя, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-6207-8071

Анотація

Вступ. Міський громадський транспорт є одним з чинників поширення інфекційних захворювань завдяки безпосереднім контактам пасажирів один з одним під час поїздки в обмеженому просторі. Прагнучи знизити ризики захворювання населення міст під час світової пандемії коронавірусу Covid-19, оператори міських пасажирських перевезень і місцева влада застосовували низку обмежень для користувачів громадського транспорту – від обмеження кількості пасажирів у салоні транспортних засобів до повного припинення послуг. Втім, на даний час відсутні обґрунтовані підходи щодо ефективності застосування таких обмежень. **Мета.** Метою статті є дослідження та статистичний аналіз мереж контактів пасажирів громадського транспорту у містах з позицій теорії складних мереж у контексті можливого поширення інфекційних захворювань. **Результати.** Рейсові мережі контактів пасажирів міського громадського транспорту можуть бути побудовані за відомими значеннями елементів матриць міжзупинкових пасажирських кореспонденцій, які можуть бути отримані за результатами обстеження пасажирських потоків. Статистичний аналіз мереж контактів пасажирів, виконаний для чотирьох маршрутів міського громадського транспорту міста Запоріжжя (Україна), показав, що вони виявляють властивості мереж «тісного світу» Вотса-Строгаца. При цьому середня кількість контактів пасажирів з іншими пасажирів під час поїздки лінійно зростає зі зростанням пасажиромісткості рухомого складу, обсягів перевезень пасажирів

за рейс та показників змінюваності пасажирів на маршруті. **Висновки.** Виявлені властивості мереж контактів пасажирів на міському громадському транспорті дають можливість застосувати до них раніше отримані результати щодо механізмів поширення інфекційних захворювань у мережах «тісного світу». Отримані залежності середньої кількості контактів пасажирів один з одним під час поїздки можуть бути використані для обґрунтування запровадження обмежувальних заходів щодо користування міським громадським транспортом та їх ефективності під час спалаху інфекційних захворювань.

Ключові слова: міський громадський транспорт, інфекційне захворювання, мережа контактів пасажирів, складні мережі.

STATISTICAL ANALYSIS OF PUBLIC TRANSPORT PASSENGERS' ENCOUNTER NETWORKS IN THE CONTEXT OF THE RISK OF THE INFECTIOUS DISEASE SPREAD

O. F. Kuzkin¹, I. M. Raida², E.V. Tereshchenko³

¹DSc, Professor at the Department of Transport Technologies,
National University Zaporizhzhia Polytechnic,
Zaporizhzhia, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-3160-1285

²Senior Lecturer at the Department of Transport Technologies,
National University Zaporizhzhia Polytechnic,
Zaporizhzhia, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-3925-4692

³PhD (Phys. & Math.), Associate Professor at the Department
of Systems Analysis and Management,
National University Zaporizhzhia Polytechnic,
Zaporizhzhia, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-6207-8071

Summary

Introduction. Urban public transport is considered as one of the key factors of the spreading of infectious diseases due to the direct interaction of passengers with each other during trips in a confined space. Trying to reduce the risk of disease among the urban population during the global pandemic of the Covid-19 coronavirus, urban passenger transport operators and local authorities have applied a number of restrictions for public transport users – from limiting the number of passengers in the vehicle to completely suspending services. However, currently, there are no substantiated approaches to the effectiveness of applying such restrictions. **Purpose.** The purpose of the article is to study and statistically analyze the encounter networks of public transport passengers in cities from the perspective of the complex networks theory in the context of the possible spread of infectious diseases. **Results.** Passenger encounter networks of urban public transport can be constructed using known values of the trip O-D matrix elements, which can be obtained from the results of passenger flow surveys. Statistical analysis of passenger encounter networks performed for four urban public transport routes in Zaporizhzhia city (Ukraine) showed that they exhibit the properties of Watts-Strogatz “small-world” networks. At the same time, the average

*number of passenger encounters with other passengers during a trip increases linearly with the increase in passenger capacity of transit vehicles, passenger transportation volumes per trip, and passenger variability indicators on the route. **Conclusions.** The revealed properties of passenger encounter networks on urban public transport make it possible to apply to them previously obtained results on the mechanisms of the infectious diseases spread in “small-world” networks. The obtained dependences of the average number of passenger encounters with each other during a trip can be used to justify the introduction of restrictive measures regarding the use of urban public transport and their effectiveness during an outbreak of infectious diseases.*

Key words: *urban public transport, infectious disease, passenger encounter network, complex networks.*

Вступ. Масовий громадський транспорт був і залишається основним способом забезпечення мобільності населення у містах безвідносно до рівня доходів громадян, їх віку та статі, фізичних можливостей чи наявності права управляти приватним автомобілем. Концепція масових перевезень людей, реалізована у технології роботи громадського транспорту, передбачає транспортування великої кількості людей у рухомому складі великої пасажиромісткості з дотриманням прийнятних умов комфортабельності перевезень, що забезпечує невисокий рівень вартості послуг для окремого пасажира, відносно малий внесок громадського транспорту у завантаження міських вулиць і доріг та забруднення навколишнього середовища. Однак, під час спалаху епідемічних захворювань така концепція громадського транспорту стає його недоліком, сприяючи поширенню інфекцій серед пасажирів [1]. Зважаючи на суттєву обмеженість, а нерідко і неможливість постійних користувачів громадського транспорту обирати інший спосіб пересування у місті у разі обмеження або припинення його роботи, задача організації роботи масового міського пасажирського транспорту під час пандемій є актуальною і це яскраво засвідчила нещодавня світова пандемія коронавірусу Covid-19.

Постановка проблеми. Пандемія коронавірусу Covid-19 поставила перед науковцями низку питань у багатьох сферах людської діяльності, і транспорт у цьому сенсі не став виключенням. Основною функцією міського громадського транспорту який є невід’ємною складовою інфраструктури сучасного міста, є забезпечення потреб населення у пересуваннях. Однак, в умовах виникнення епідемічних загроз, міський масовий пасажирський транспорт може розглядатись як один з ключових чинників, що сприяють поширенню інфекційних захворювань [2]. На сьогодні не можна однозначно стверджувати, що система міського громадського транспорту є основним фактором розповсюдження епідемічної небезпеки, втім особливості технологічного процесу його роботи – накопичення пасажирів на зупинках, спільне використання великою кількістю пасажирів обмеженого простору та площі рухомого складу пасажирського транспорту під час поїздки, – створюють передумови для розповсюдження вірусних інфекцій, які передаються від хворої до здорової людини безпосередньо (повітряно-крапельним шляхом) або опосередковано (через контактні поверхні).

На ступінь ризику передачі захворювання при користуванні громадським транспортом потенційно впливає низка факторів, таких як пасажиромісткість

рухомого складу та ступінь її використання, закономірності обсягів пасажирообміну на зупинках, тривалість перебування пасажирів на зупинках в очікуванні транспорту та у транспортних засобах під час поїздки, просторова та об'ємна щільність пасажирів у салоні транспортного засобу, кількість і характеристики контактних поверхонь салону (пасажирських дверей, поручнів, люків) тощо. Крім того, структура маршрутної мережі також може впливати на процеси передавання захворювання [3].

Оскільки механізм передавання вірусних інфекцій від хворої людини до здорової при користуванні громадським транспортом передбачає їх безпосередній або опосередкований контакт, постає задача встановлення закономірностей виникнення таких контактів, їх впливу на потенційний ризик розповсюдження інфекцій та захворювання пасажирів, а також оцінки ефективності використання організаційно-технологічних заходів, які можуть бути застосовані на громадському транспорті, щодо ступеня цього ризику під час спалаху епідемічних небезпек.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Світова пандемія коронавірусу Covid-19 та його важкі наслідки на початку розповсюдження інфекції вимусили операторів громадського транспорту у містах реагувати на нові виклики з метою вирішення основного завдання – зменшення потенційної епідемічної небезпеки для пасажирів при користуванні міським масовим пасажирським транспортом. На практиці для вирішення цього завдання вживались різноманітні заходи, такі як: обов'язкове носіння засобів індивідуального захисту (захисних масок) під час перебування у салоні транспортних засобів; забезпечення певного рівня соціального дистанціювання у салоні транспортного засобу та на обмежених площах інфраструктури громадського транспорту (зупинках, терміналах, транспортно-пересадкових вузлах); регулярна санітарна обробка внутрішніх поверхонь рухомого складу громадського транспорту; контроль та виявлення ознак захворювання під час доступу до рухомого складу та об'єктів інфраструктури громадського транспорту тощо.

Індивідуальні захисні маски використовувались майже всюди і показали значну ефективність. Дослідження показали, що цей найпростіший спосіб захисту від прямого потрапляння вірусу від хворої до здорової людини дозволяє знизити потенційний ризик захворювання більш ніж на 90% [4].

Концепція фізичного дистанціювання стала одним з найпоширеніших нефармацевтичних заходів, які були застосовані для запобігання передаванню коронавірусу Covid-19. Всесвітня організація охорони здоров'я рекомендувала уникати скупчення людей і тісного контакту, тримати фізичну дистанцію принаймні 1 метр від інших, навіть якщо вони не виглядають хворими [5]. З точки зору механізму передавання інфекції, такі заходи виглядають ефективними, але вони є найбільш складними для реалізації саме у громадському транспорті, бо збільшення відстані фізичного дистанціювання суттєво зменшує провізну спроможність рухомого складу громадського транспорту через зменшення його ефективної пасажиромісткості. Можна навіть сказати, що концепція фізичного дистанціювання прямо суперечить самій концепції громадського транспорту [6].

Окрім згаданих вище підходів до зменшення ризиків розповсюдження інфекції у міських системах громадського транспорту, використовувалось також

припинення функціонування окремих міських маршрутів [7], запровадження обмежень на кількість пасажирів, що одночасно перебувають у пасажирських транспортних засобах [8], введення пріоритетів серед населення щодо доступу до послуг міського громадського транспорту з метою обмеження потенційної кількості пасажирів та транспортної рухливості населення [9]. Всі ці заходи мали на меті мінімізацію ризиків захворювання у громадському транспорті за умови, що транспорт є джерелом подібної небезпеки. Втім, результати досліджень науковців не дають підстав для однозначного твердження, що це насправді так.

Так, у роботі [2] громадський транспорт розглядається як каталізатор для розповсюдження інфекційних захворювань та висувається твердження про його значний потенційний вплив на прискорення розповсюдження інфекційних захворювань. Аналогічно, у роботі [7] стверджується, що автобусна маршрутна система та її характеристики відіграють суттєву роль в процесі поширення інфекційних захворювань. У роботі ж [4] науковці вважають міський громадський транспорт найбільш критичним фактором у механізмі поширення інфекції серед населення.

Втім, існують й інші думки стосовно ролі громадського транспорту в розповсюдженні епідемічної загрози. Дані досліджень, наведені у роботі [3], свідчать про те, що поїздки в громадському транспорті не є основними причинами захворювання для пасажирів, при цьому частка випадків захворювань у громадському транспорті не перевищує 18% від їх загального масиву. Результати, наведені у роботі [10], показали, що міський громадський транспорт виявився навіть відносно безпечним середовищем для пасажирів і не став причиною захворювання основної маси населення.

Таким чином, роль громадського транспорту у розповсюдженні небезпечних епідемічних захворювань залишається до кінця не з'ясованою. Втім, як показав урок пандемії коронавірусу Covid-19, міський громадський транспорту стикнувся з відсутністю дієвих та науково обґрунтованих політик і заходів протидії можливого розповсюдженню вірусних інфекцій у разі виникнення пандемій, особливо на їх початковій стадії. Виходячи з цього, дослідження з аналізу заходів протидії потенційному поширенню інфекційних захворювань на громадському транспорті під час раптового виникнення епідемій та пандемій, а також визначення ступеня ефективності таких заходів, є актуальною науковою задачею.

Формулювання цілей статті. Метою дослідження є розробка підходу до побудови мереж контактів пасажирів на міському громадському транспорті на підставі результатів обстеження пасажирських потоків та змістовний статистичний аналіз таких мереж, отриманих емпіричним шляхом, методами теорії складних мереж у контексті ризику захворювання пасажирів під час спалаху вірусних інфекцій.

Викладення основного матеріалу дослідження. Мережа контактів пасажирів та її формування. Мережею контактів пасажирів (МКП) громадського транспорту будемо називати неорієнтований незважений граф без петель і кратних ребер $G = (V, E)$, множину вершин якого V утворюють пасажирів, які були перевезені пасажирським транспортним міського громадського транспорту під час виконання останнім одного рейсу на деякому маршруті. Дві вершини такого графа будуть з'єднані ребром $e \in E$, якщо відповідна пара пасажирів під час здійснення поїздки одночасно перебувала, та, отже, мала високу імовірність контакту

один з одним в салоні транспортного засобу. Зрозуміло, що сам факт знаходження пасажирів в одному транспортному засобі з іншими пасажирів під час поїздки ще не означає у наслідку його захворювання, оскільки на процес передавання інфекції впливає низка невизначених факторів, таких як: сприйнятливість пасажирів до захворювання, фактичний стан здоров'я інших пасажирів, дистанція між пасажирів у салоні, використання пасажирів засобів індивідуального захисту тощо. Але цілком логічним є припущення, що чим більше контактів з іншими пасажирів має пасажир під час поїздки, тим вищим є ризик його захворювання інфекційними хворобами, які передаються повітряно-крапельним або контактним шляхом.

Подібний підхід до формального представлення мереж контактів людей між собою, в тому числі пасажирів на міському громадському транспорті, широко використовується науковцями, в тому числі і у аспекті дослідження процесів поширення вірусних інфекцій. У попередніх дослідженнях мережі контактів пасажирів в залежності від мети та умов вирішуваних задач використовувались: статичні (з постійним набором вершин та ребер у часі) та динамічні (зі змінним набором вершин і ребер у часі), орієнтовані, напіворієнтовані, зважені графи та мультиграфи; елементарні (що відбивають контакти пасажирів протягом одного рейсу на міському маршруті) та агреговані (що відбивають контакти пасажирів на одному чи декількох маршрутах протягом певного проміжку часу). В якості ваги ребра у мережі контактів людей зазвичай приймається ефективний рівень передавання захворювання або тривалість безпосереднього контакту [2, 7, 11, 12, 13, 14, 15]. Так, у роботі [7] моделювався процес розповсюдження епідемічної загрози з використанням динамічної мережі контактів окремого пасажирів. У роботі [4] з використанням зваженої МКП моделювався процес пересування хворої людини з використанням системи міського громадського транспорту. З використанням МКП у [16] моделювався сам процес передачі захворювання, а у роботі [8] – оцінювався ризик посадки в пасажирський транспортний засіб на окремих зупинках та моделювався вплив окремих обмежувальних заходів на громадському транспорті на потенційне розповсюдження хвороби.

Вихідною інформацією для побудови МКП служить рейсова матриця міжзупинкових пасажирських кореспонденцій (ММПК) $X = \{x_{ij}\} (i, j = \overline{0, n})$, де n – кількість зупинок на маршруті. Елементи ММПК x_{ij} показують кількість пасажирів, що проїхали маршрутом від зупинки i до зупинки j з усіх пасажирів, що увійшли до транспортного засобу на зупинці i . Вони можуть бути отримані за даними безпосередніх спостережень або за допомогою моделювання. Останній спосіб є найпоширенішим, оскільки інформація про кількість пасажирів a_i , що увійшла до транспортного засобу на зупинці i ($i = \overline{0, n-1}$) та кількість пасажирів b_j , що вийшла з транспортного засобу на зупинці j ($j = \overline{1, n}$) може бути отримана з автоматизованих систем обліку пасажирів та оплати проїзду за допомогою смарт-карт (такий спосіб використовувався при дослідженні МКП у системі автобусних перевезень Сінгапуру [7], в метрополітенах міст Китаю [2], в громадському транспорті міст Південної Кореї [4]) або безпосередньо за допомогою обстеження пасажирських потоків.

Нехай зупинки маршруту, починаючи з початкової, пронумеровані порядковими числами $0, 1, \dots, n$. Якщо відома інформація про кількість пасажирів, які увійшли a_i

та вийшли b_j на кожній зупинці маршруту під час рейсу ($\sum_{i=0}^n a_i = \sum_{j=0}^n b_j$, $i, j = \overline{0, n}$), тоді елементи ММПК з достатньою для практичних цілей точністю можуть бути розраховані за формулою [17]:

$$x_{ij} = \begin{cases} \frac{\prod_{r=i+1}^{j-1} (Q_r - b_r)}{\prod_{r=i+n}^j Q_r} \cdot a_i \cdot b_j, \text{ якщо } j > i + 1; \\ \frac{1}{Q_j} \cdot a_i \cdot b_j, \text{ якщо } j = i + 1; \\ 0, \text{ якщо } j \leq i, \end{cases} \quad (1)$$

де $i, j = \overline{0, n}$; $Q_r = Q_{r-1} - b_{r-1} + a_{r-1} = \sum_{i=0}^{r-1} (a_i - b_i)$.

Кількість вершин МКП, побудованої на підставі відомої ММПК, буде дорівнювати загальній кількості пасажирів, що скористалися маршрутом за рейс, тобто $n(G) = \sum_{i=0}^n a_i = \sum_{j=0}^n b_j$. Зрозуміло, що довільний пасажир $v_k = v(s, d) \in V$ ($s \in [0 \dots n-1], d > s$), який увійшов до транспортного засобу на деякій зупинці s та вийшов з нього на деякій зупинці d , протягом поїздки знаходився у транспортному засобі одночасно з усіма пасажирами $v_p = v(i, j) \in V$ ($j > i$), для яких виконується умова $(j > s) \& (i < d)$. У такому випадку відповідні вершини v_k та v_p МКП будуть зв'язані ребром (v_k, v_p) .

Побудована таким чином МКП представляє собою граф, формування якого відбувається під дією випадкових факторів, оскільки імовірність повторення однієї й тієї ж ММПК для різних рейсів транспортного засобу на міському маршруті громадського транспорту є низькою. Таким чином, кожному окремому рейсу транспортного засобу буде відповідати майже унікальна МКП. З цієї точки зору цікавість представляє пошук спільності і відмінності окремих МКП та дослідження їх властивостей з метою віднесення таких МКП до одного з окремих класів складних мереж [18], закономірності розповсюдження у яких інфекційних захворювань вже отримані науковцями.

Характеристики мереж контактів пасажирів. До основних числових характеристик мереж контактів пасажирів, які визначають їх властивості з позиції теорії складних мереж, відносять [18, 19]:

1) середню степінь вершини мережі $\langle k \rangle$, яка визначається як середнє арифметичне степенів усіх вершин мережі

$$\langle k \rangle = \frac{1}{n(G)} \sum_{i=1}^{n(G)} k_i, \quad (2)$$

де k_i – степінь вершини i ($v_i \in G$) мережі;

2) середню довжину найкоротшого шляху мережі $\langle l \rangle$, виражену у кількості ребер мережі, яка є лінійною характеристикою мережі та розраховується як середнє арифметичне найкоротших шляхів між усіма парами вершин мережі \tilde{l}_{ij}

$$\langle l \rangle = \frac{2}{n(G)[n(G)-1]} \sum_{j=1, i>j}^{n(G)} \tilde{l}_{ij}. \quad (3)$$

3) кластерний коефіцієнт C мережі є мірою її зв'язності та розраховується за формулою

$$C = \frac{1}{n(G)} \sum_{i=1}^{n(G)} c_i, \quad (4)$$

де c_i – кластерний коефіцієнт вершини $(v_i \in G)$ мережі, який дорівнює імовірності того, що будь-які дві вершини, суміжні даній, також є суміжними, та розраховується за формулою

$$C_i = \frac{2 \cdot E_i}{k_i(k_i - 1)}, \quad (5)$$

де E_i – кількість ребер мережі, які зв'язують між собою усі вершини, які суміжні даній вершині v_i .

Значення кластерного коефіцієнта мережі $C \in [0..1]$ при цьому $C = 0$ для ациклічних мереж (дерев) та $C = 1$, для повних мереж, у яких будь-яка пара вершин з'єднана ребром;

4) коефіцієнт асортативності мережі r розраховується як коефіцієнт лінійної кореляції Пірсона між степенями усіх її суміжних вершин та може бути визначений за формулою

$$r = \frac{\sum \sum_{e=1}^E k_{ei} \cdot k_{ej} - [\sum_{e=1}^E k_{ei}]^2}{\sqrt{\sum \sum_{e=1}^E k_{ei}^2 - [\sum_{e=1}^E k_{ei}]^2}}, \quad (6)$$

де E – кількість ребер мережі;

k_{ei}, k_{ej} – степені вершин мережі, які є інцидентними ребру $e \in E$.

Мережі, для яких $r \rightarrow -1$, називають дизасортативними, у той час як мережі з $r \rightarrow 1$ називають асортативними.

Дослідження мереж контактів пасажирів на автобусних маршрутах міста Запоріжжя. Для дослідження було обрано чотири міських автобусних маршрути загального користування міста Запоріжжя (рис. 1), які обслуговуються рухомим складом різної пасажиромісткості. Характеристики досліджуваних маршрутів наведені у табл. 1.

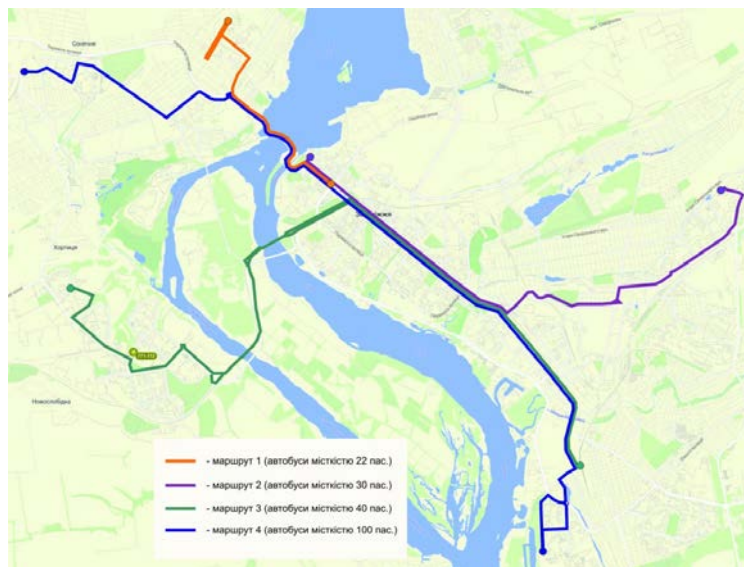


Рис. 1. Досліджувані автобусні маршрути міста Запоріжжя

Для кожного маршруту протягом одного дня тижня було проведено вибіркове обстеження рейсів обліковцями, що перебували у салоні транспортного засобу. Обліковці фіксували кількість пасажирів, що увійшли та вийшли на кожній зупинці маршруту. Надалі за отриманими даними для кожного обстеженого рейсу за формулою (1) розраховувались елементи рейсової ММПК, будувалась рейсова МКП

та розраховувались її показники за формулами (2)-(6). Для розрахунку показників МКП було розроблене програмне забезпечення мовою Python з використанням функцій бібліотеки networkX. Приклади візуалізації рейсових МКП наведені на рис. 2.

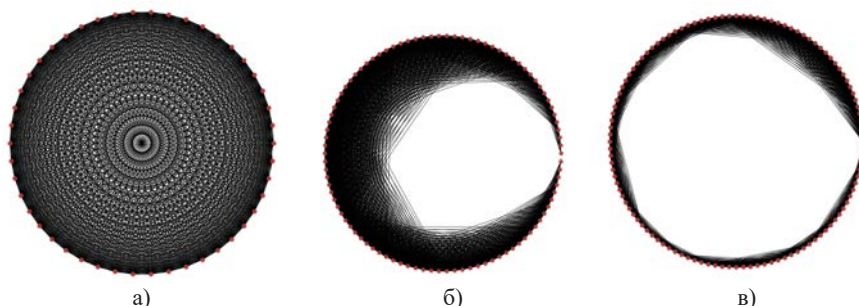


Рис. 2. Приклади рейсових мереж контактів пасажирів:

$$n(G) = 46, E = 1031, \langle l \rangle \sim 1 \text{ (a)}; n(G) = 94, E = 2059, \langle l \rangle = 1,78 \text{ (б)}; n(G) = 112, E = 1438, \langle l \rangle = 3,54 \text{ (в)}$$

Результати розрахунку усереднених показників рейсових МКП (за години «пік», міжпіковий період доби та в цілому за добу) наведений у табл. 2. До пікових періодів з максимальним попитом на перевезення пасажирів віднесені рейси, що виконувались з 06:00 до 09:00 та з 16:00 до 19:00, до міжпікового періоду – рейси, що виконувались з 09:00 до 16:00.

Таблиця 1

Характеристика досліджуваних маршрутів

Номер маршруту	Тип маршруту	Довжина маршруту, км	Кількість зупинок	Місткість автобусів, пас.	Кількість обстежених рейсів
1	радіальний	7,9	13 (12)	22	96
2	радіальний	15,1	25 (27)	30	52
3	діаметральний	22,5	33 (34)	40	31
4	діаметральний	22,4	35 (34)	100	34

Аналіз результатів розрахунків характеристик МКП свідчить, що вони характеризуються великими значеннями кластерного коефіцієнту C та малими значеннями середньої довжини найкоротшого шляху $\langle l \rangle$ у порівнянні з розміром мережі. Це цілком відповідає механізму утворення таких МКП, зумовленому технологією роботи міського маршрутного пасажирського транспорту та дає підстави віднести такі МКП до класу моделей мереж «тісного світу» Вотса-Строгаца [11], у яких середня довжина найкоротшого шляху дорівнює $\langle l \rangle = n(C)/2\langle k \rangle$, а кластерний коефіцієнт $C \rightarrow 3/4$.

Дійсно, в процесі руху пасажирського транспортного засобу по маршруту усі пасажирів, що перебувають у ньому, утворюють кластер, якому відповідає повний підграф МКП. Множина пасажирів, що входять до транспортного засобу на деякій зупинці, у свою чергу теж представляють собою такий підграф (кластер), який приєднується до кластеру пасажирів у салоні транспортного засобу, утворюючи зв'язки між кожним пасажиром, що увійшов до транспортного засобу та кожним

пасажиром, що перебуває у транспортному засобі після виходу пасажирів на даній зупинці. Пасажири у МКП можуть бути попарно не зв'язаними між собою чи зв'язаними між собою безпосередньо або через деяку кількість посередників. У останньому випадку безпосереднє контактування цих пасажирів під час поїздки взагалі є виключеним. Ризик передавання інфекційного захворювання через одного або декількох посередників під час поїздки громадським транспортом є малим, оскільки тривалість рейсової поїздки у місті є невеликою, при цьому напрямок передавання інфекції може бути лише одностороннім – від пасажирів, що зайшов до транспортного засобу раніше, до пасажирів, що зайшов до транспортного засобу пізніше. Зауважимо також, що ми не розглядаємо малоймовірний випадок, коли протягом рейсу на деяких перегонах маршруту, окрім першого та останнього, у транспортному засобі не перебувало жодного пасажирів. У такому разі МКП розпадається на декілька незв'язних компонент.

Значення коефіцієнтів асортативності досліджуваних МКП свідчать, що вони переважно є близькими до некорельованих мереж для маршрутів з пасажиромісткістю транспортних засобів 22 ... 40 пасажирів та асортативними для маршруту з пасажиромісткістю 100 пасажирів. Це можна пояснити тим, що при використанні на маршруті рухомого складу великої пасажиромісткості кількість пасажирів, що входять до нього на зупинці, є близькою до кількості пасажирів, що вже знаходяться у салоні, у той час як для рухомого складу середньої та малої пасажиромісткості ці кількості є суттєво відмінними.

З точки зору ризику передачі захворювання пасажирів при користуванні громадським транспортом визначальним є середня кількість контактів пасажирів з іншими пасажирами під час поїздки, яка у прийнятій моделі відповідає середній

Таблиця 2

Усереднені характеристики МКП по обстежених маршрутах

Показник	Період часу	Маршрут			
		1	2	3	4
1. Середня кількість вершин мережі $n(G)$	пік	19,27	32,22	42,53	129,53
	міжпік	15,18	27,00	39,08	118,84
	доба	17,40	29,71	41,19	123,56
2. Середня кількість ребер мережі E	пік	229,79	473,04	863,47	5297,8
	міжпік	125,02	311,52	708,25	4102,8
	доба	181,77	395,38	803,39	4630,0
3. Середня степінь вершини $\langle k \rangle$	пік	17,74	28,1	36,9	73,4
	міжпік	13,9	22,26	35,28	57,28
	доба	15,98	25,3	36,26	64,38
4. Середня довжина найкоротшого шляху $\langle l \rangle$	пік	1,045	1,101	1,139	1,619
	міжпік	1,017	1,147	1,072	1,869
	доба	1,032	1,123	1,113	1,759
5. Кластерний коефіцієнт C	пік	0,973	0,950	0,939	0,845
	міжпік	0,990	0,935	0,961	0,827
	доба	0,981	0,943	0,948	0,835
6. Коефіцієнт асортативності r	пік	-0,079	-0,028	-0,036	0,395
	міжпік	-0,061	-0,068	-0,035	0,441
	доба	-0,072	-0,047	-0,036	0,421

степені вершини $\langle k \rangle$. Зрозуміло, що на фактичні значення $\langle k \rangle$ рейсової МКП впливають особливості формування пасажиропотоків на певному маршруті у певний період часу, втім можна зробити припущення, що у загальному випадку середня кількість контактів пасажирів за рейс залежить від обсягу перевезень пасажирів за рейс Q , пасажиромісткості рухомого складу q , та показників змінюваності пасажирів у рухомому складі протягом рейсу. Числовою характеристикою останнього може служити коефіцієнт змінюваності пасажирів $k_{зм}$, який визначається за формулою:

$$k_{зм} = \frac{l_M}{\bar{l}} = \frac{Q}{\bar{q}}, \quad (7)$$

де l_M – довжина маршруту, км;

\bar{l} – середня відстань поїздки пасажирів за рейс, км;

\bar{q} – середня кількість фактично використаних пасажиро-місць за рейс, яку назвемо рейсовою ефективною пасажиромісткістю рухомого складу (РЕПМ).

Оскільки у нашому дослідженні пасажиромісткість рухомого складу не є достатньо варіативною, дискретною і представлена лише чотирма значеннями, умовно приймемо в якості фактичної пасажиромісткості рухомого складу саме РЕПМ, який у відповідності до (7) можна розрахувати за формулою:

$$\bar{q} = \frac{Q \cdot \bar{l}}{l_M} \quad (8)$$

Складові формули (8) можна знайти для кожного обстеженого рейсу, використовуючи рейсову ММПК за відомою довжиною перегонів маршруту.

На рис. 3 наведені залежності середньої кількості контактів одного пасажирів за рейс від обсягу перевезених пасажирів за рейс та рейсової ефективною пасажиромісткості рухомого складу (обсяг вибірки $n=213$ пар даних).

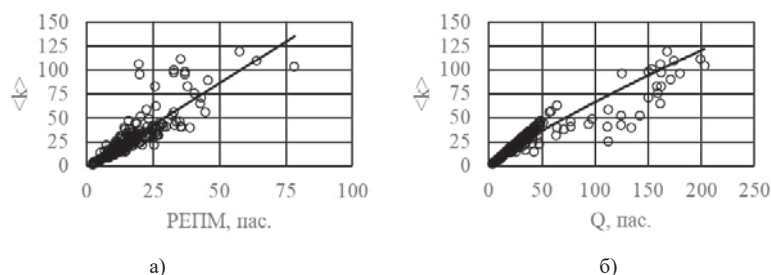


Рис. 3. Залежність середньої кількості контактів пасажирів від рейсової ефективною пасажиромісткості рухомого складу (а) та обсягу перевезень пасажирів за рейс (б)

Аналіз залежностей, наведених на рис. 3, свідчить, що середня кількість контактів пасажирів за рейс лінійно зростає при зростанні РЕПМ (розрахунковий лінійний коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,713$). Залежність середньої кількості контактів пасажирів від обсягу перевезень пасажирів за рейс є прямою лінійною для рухомого складу ефективною пасажиромісткістю до $q \approx 50$ пасажирів, після чого має тенденцію до нелінійного зростання при збільшенні значень РЕПМ ($R^2 = 0,864$ для степеневій моделі з показником степеня меншим за одиницю та $R^2 = 0,859$ для лінійної моделі).

Висновки. В результаті моделювання та дослідження рейсових мереж контактів пасажирів на підставі результатів обстеження пасажирських потоків на маршрутах міського громадського транспорту міста Запоріжжя виявлено, що досліджувані мережі контактів пасажирів мають властивості мереж «тісного світу» Вотса-Строгаца з великими значеннями кластерного коефіцієнту та малим значенням середньої довжини найкоротшого шляху у порівнянні з розмірами мережі. Це дає можливість застосувати для аналізу ризику передачі інфекційних захворювань під час користування громадським транспортом результатів щодо механізмів поширення інфекцій у подібних мережах іншої природи походження. В якості показника умовного ризику захворювання пасажирів прийнято середню кількість контактів пасажирів з іншими пасажирів під час маршрутної поїздки. Дослідженнями встановлено, що умовний ризик захворювання пасажирів під час поїздки міським громадським транспортом знаходиться у прямій лінійній залежності від середньої кількості фактично використаних пасажиромісць у рухомому складі за рейс та нелінійно зростає в залежності від обсягу перевезень пасажирів за рейс. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування режимів роботи та ефективності заходів щодо обмеження користування громадським транспортом під час пандемії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кузькін О.Ф., Райда І.М., Лебідь О.С. Проблематика функціонування транспортної інфраструктури під час епідемічних спалахів – Транспортні технології та безпека дорожнього руху. Збірник тез доповідей Четвертої всеукраїнської науково-практичної конференції 13–14 квітня 2023 р., Запоріжжя [Електронний ресурс] – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2023, 33-35 с. URL: http://eir.zp.edu.ua/bitstream/123456789/9941/1/Transport_technologies.pdf
2. Qian X., Sun L., Ukkusuri S.V. Scaling of contact networks for epidemic spreading in urban transit systems. *ResearchGate*, February 2021, 11(1):4408. doi:10.1038/s41598-021-83878-7
3. Qian X., Ukkusuri S.V. Modeling the spread of infectious disease in urban areas with travel contagion. *Cornell University*, May 2020, arXiv: 2005.04583. doi:10.48550/arXiv.2005.04583
4. Ku D., Yeon C., Lee S., Lee K., Hwang K., Li Y.C., Wong S.C. Safe traveling in public transport amid COVID-19. *Science Advances*, October 2021, Vol. 7, Issue 43. doi: 10.1126/sciadv.abg3691
5. Advice for the public: Coronavirus disease (COVID-19) [Electronic resource]. URL: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/advice-for-public> (accessed: 07.12.2024)
6. Musselwhite Ch., Aveneri E., Susilo Y. The Coronavirus Disease COVID-19 and implications for transport and health. *Journal of Transport & Health*, April 2020, 16(1): 100853. doi: 10.1016/j.jth.2020.100853
7. Mo B., Feng K., Shen Yu, Tam C., Li D., Yin Y., Zhao J. Modeling epidemic spreading through public transit using time-varying encounter network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, January 2021, Volume 122:102893. doi: 10.1016/j.trc.2020.102893
8. Kumar P., Khani A., Lind E., Levin J. Estimation and Mitigation of Epidemic Risk on a Public Transit Route using Automatic Passenger Count Data. *Transportation Research Record Journal*, February 2021, Vol. 2675(6). doi: 10.1177/0361198120985133

9. Luo Qi, Gee M., Piccoli B., Work D., Samaranayake S. Managing public transit during a pandemic: The trade-off between safety and mobility. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, May 2022, Volume 138:103592. doi: 10.1016/j.trc.2022.103592
10. Tapiador L., Gomez J., Vassallo J.M. Exploring the relationship between public transport use and COVID-19 infection: A survey data analysis in Madrid Region. *Sustainable Cities and Society*, May 2024, Volume 104:105279. doi: 10.1016/j.scs.2024.105279
11. Pastor-Satorras R., Vespignani A. Epidemic dynamics in finite size scale-free networks. *Physical Review E*, March 2002, Vol. 65:035108. doi: 10.1103/PhysRevE.65.035108
12. Zhang X., Sun G.-Q., Zhu Y.-X., Ma J. Epidemic dynamics on semi-directed complex networks. *Mathematical Biosciences*, October 2013, Vol. 246(2). doi: 10.1016/j.mbs.2013.10.001
13. Barrat A., Barthelemy M., Pastor-Satorras R., Vespignani A. The architecture of complex weighted networks. *Applied Physical Sciences*, March 2004, 101(11)3774-3752. doi: 10.1073/pnas.04000871
14. Lü L., Chen D.-B., Zhou T. The small world yields the most effective information spreading. *New Journal of Physics*, December 2011, abs/1107.0429(12). doi: 10.1088/1367-2630/13/12/123005
15. Sun L., Axhausen K.W., Lee D.-H., Huang X. Understanding metropolitan patterns of daily encounters. *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.*, January 2013. Vol. 110, № 34. doi: 10.1073/pnas.1306440110
16. Bota A., Gardner L.M., Khani A. Identifying Critical Components of a Public Transit System for Outbreak Control. *Networks and Spatial Economics*, December 2017, 17(1). doi: 10.1007/s11067-017-9361-2
17. Організація автобусних перевезень у містах: навч. посібник / О. С. Ігнатенко, В. С. Маруніч. Український транспортний ун-т. – К. : [б.в.], 1998. – 193 с.
18. Складні мережі / [Ю. Головач, О. Олемської, К. фон Фербер та ін.] *Журнал фізичних досліджень*, 2006, Т. 10, № 4, С. 247-289.
19. Кузькін О.Ф. Розвиток маршрутних мереж громадського транспорту великих міст України. *Наукові нотатки*, 2014, № 46, С. 332–340.

REFERENCES

1. Kuzkin O.F., Raida I.M., Lebid O.S. (2023) Problematyka funktsionuvannia transportnoi infrastruktury pid chas epidemichnykh spalakhiv. [Problems of functioning of transport infrastructure during epidemic outbreaks] – Transportni tekhnolohii ta bezpeka dorozhnoho rukhu. Zbirnyk tez dopovidei Chetvertoi vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii 13–14 kvitnia 2023 r., Zaporizhzhia [Transport technologies and road safety. Collection of abstracts of the Fourth All-Ukrainian Scientific and Practical Conference, April 13–14, 2023, Zaporizhzhia] [Electronic resource]. [in Ukrainian].
2. Qian X., Sun L., Ukkusuri S.V. (2021) [Scaling of contact networks for epidemic spreading in urban transit systems]. [ResearchGate], February, 11(1):4408.
3. Qian X., Ukkusuri S.V. (2020) [Modeling the spread of infectious disease in urban areas with travel contagion]. [Cornell University], May, arXiv: 2005.04583.

4. Ku D., Yeon C., Lee S., Lee K., Hwang K., Li Y.C., Wong S.C. (2021) [Safe traveling in public transport amid COVID-19]. [Science Advances], October, Vol. 7, Issue 43.
5. Advice for the public: Coronavirus disease (COVID-19) (2024) [Electronic resource].
6. Musselwhite Ch., Aveneri E., Susilo Y. (2020) [The Coronavirus Disease COVID-19 and implications for transport and health]. [Journal of Transport & Health], April, 16(1): 100853.
7. Mo B., Feng K., Shen Yu, Tam C., Li D., Yin Y., Zhao J. (2021) [Modeling epidemic spreading through public transit using time-varying encounter network]. [Transportation Research Part C: Emerging Technologies], January, Volume 122:102893.
8. Kumar P., Khani A., Lind E., Levin J. (2021) [Estimation and Mitigation of Epidemic Risk on a Public Transit Route using Automatic Passenger Count Data]. [Transportation Research Record Journal], February, Vol. 2675(6).
9. Luo Qi, Gee M., Piccoli B., Work D., Samaranayake S. (2022) [Managing public transit during a pandemic: The trade-off between safety and mobility]. [Transportation Research Part C: Emerging Technologies], May, Volume 138:103592.
10. Tapiador L., Gomez J., Vassallo J.M. (2024) [Exploring the relationship between public transport use and COVID-19 infection: A survey data analysis in Madrid Region]. [Sustainable Cities and Society], May, Volume 104:105279.
11. Pastor-Satorras R., Vespignani A. (2002) [Epidemic dynamics in finite size scale-free networks]. [Physical Review E], March, Vol. 65:035108.
12. Zhang X., Sun G.-Q., Zhu Y.-X., Ma J. (2013) [Epidemic dynamics on semi-directed complex networks]. [Mathematical Biosciences], October, Vol. 246(2).
13. Barrat A., Barthelemy M., Pastor-Satorras R., Vespignani A. (2004) [The architecture of complex weighted networks]. [Applied Physical Sciences], March, 101(11)3774-3752.
14. Lü L., Chen D.-B., Zhou T. (2011) [The small world yields the most effective information spreading]. [New Journal of Physics], December, abs/1107.0429(12).
15. Sun L., Axhausen K.W., Lee D.-H., Huang X. (2013) [Understanding metropolitan patterns of daily encounters]. [Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.], January, Vol. 110, № 34.
16. Bota A., Gardner L.M., Khani A. (2017) [Identifying Critical Components of a Public Transit System for Outbreak Control]. [Networks and Spatial Economics], December, 17(1).
17. Ihnatenko O. S., Marunych V. S. (1998) Orhanizatsiia avtobusnykh perevezen u mistakh. [Organization of bus transportation in cities]. Study Guide. Ukrainian Transport University – Kyiv : [w.p.] – 193 p. [in Ukrainian].
18. Holovach Yu., Oliemskoi O., fon Ferber K. etc. (2006) Skladni merezhi. [Complex networks]. Zhurnal fizychnykh doslidzhen. [Journal of Physical Research], Vol. 10, № 4, P. 247-289. [in Ukrainian].
19. Kuzkin O.F. (2014) Кузькін О.Ф. Rozvytok marshrutnykh merezh hromadskoho transportu velykykh mist Ukrainy. [Development of public transport route networks in large cities of Ukraine]. Naukovi notatky. [Scientific notes], № 46, C. 332–340. [in Ukrainian].

**ОЦІНКА РИЗИКУ ПОРУШЕННЯ СТАЛОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ
ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ МОРСЬКОГО
КОНТЕЙНЕРНОГО ТЕРМІНАЛУ**

І.М. Ларіна

Phd здобувач кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт»,
Одеський національний морський університет,

Одеса, Україна

ORCID ID: 0009-0005-1169-7223

Анотація

Стале функціонування морських контейнерних терміналів забезпечує необхідний рівень контейнерної логістики, що є важливим для транспортної галузі країни та конкурентоспроможності українських портів. Для підприємств, які пов'язані з певною виробничою системою та відповідним комплексом технічних засобів та технологічного обладнання, стале функціонування визначається можливістю забезпечення певного рівня виробничої потужності. Для контейнерних терміналів такою характеристикою є пропускна спроможність терміналу. Забезпечення певного рівня пропускної спроможності терміналу базується на моніторингу та оцінці ризиків порушення сталого функціонування для подальшої розробки відповідного комплексу заходів протидії. Запропоновано метод оцінки ризику порушення сталого функціонування контейнерного терміналу у контексті його техніко-технологічної системи. Оцінка ризику сталого функціонування терміналу в цілому передбачає покроковий розгляд ризику функціонування технологічного комплексу певного причалу, а також ризику функціонування певного технологічного обладнання – враховуючи декомпозицію пропускної спроможності терміналу та умови його сталого функціонування. Такій підхід враховує певний вплив устаткування та причалів на загальну пропускну спроможність терміналу. Запропонований метод базується на існуючих підходах для оцінки ризиків у різних сферах, розвиваючи їх з урахуванням сутності та прийнятих критеріїв сталого функціонування, а також у прикладному напрямку з врахуванням галузевої специфіки при формуванні системи факторів впливу, а також при формалізації важливих елементів (устаткування) та підсистем (причалів) у структурі загального (інтегрального) ризику порушення сталого функціонування терміналу. Проведено відповідні експериментальні розрахунки з метою перевірки працездатності запропонованого методу та його достовірності.

Ключові слова: контейнерні перевезення, термінал, порт, ризик, пропускна спроможність, ймовірність.

**RISK ASSESSMENT OF MARINE CONTAINER TERMINAL TECHNOLOGICAL
SYSTEM SUSTAINABLE FUNCTIONING DISTURBANCE**

I.M. Larina

Phd applicant of the Department “Port Operations and Handling Technology”,
Odesa National Maritime University,
Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0009-0005-1169-7223

Summary

Sustainable operation of sea container terminals provides the necessary level of container logistics, which is important for the country's transport industry and the competitiveness of Ukrainian ports. For enterprises that are associated with a certain production system and a corresponding set of technical means and technological equipment, sustainable operation is determined by the ability to ensure a certain level of production capacity. For container terminals, such a characteristic is the terminal's throughput capacity. Ensuring a certain level of terminal throughput is based on monitoring and assessing the risks of disruption of sustainable operation for the further development of an appropriate set of countermeasures. A method for assessing the risk of disruption of sustainable operation of a container terminal in the context of its technical and technological system is proposed. The assessment of the risk of sustainable operation of a terminal as a whole involves a step-by-step consideration of the risk of the operation of the technological complex of a particular berth, as well as the risk of the operation of certain technological equipment – taking into account the decomposition of the terminal's throughput capacity and the conditions of its sustainable operation. This approach takes into account a certain influence of equipment and berths on the overall throughput of the terminal. The proposed method is based on existing approaches to risk assessment in various areas, developing them taking into account the essence and accepted criteria for sustainable operation, as well as in an applied direction taking into account industry specifics when forming a system of influence factors, as well as when formalizing the levers of elements (equipment) and subsystems (berths) in the structure of the general (integral) risk of disruption of the sustainable operation of the terminal. Relevant experimental calculations have been carried out to verify the operability of the proposed method and its reliability.

Key words: container transportation, terminal, port, risk, capacity, probability.

Вступ. Сучасні контейнерні перевезення мають справу з множиною викликів – автоматизація [1, 2], цифровізація [3, 4], екологічність [5], що у свою чергу формує нові виклики та завдання для портів та портових терміналів. Проте вплив зовнішнього середовища та невизначеність контейнеропотоків [6, 7] обґрунтовують необхідність забезпечення сталого функціонування терміналів та портів.

Стале функціонування морських контейнерних терміналів забезпечує необхідний рівень контейнерної логістики, що є важливим для транспортної галузі країни та конкурентоспроможності українських портів.

Для підприємств, які пов'язані з певною виробничою системою та відповідним комплексом технічних засобів та технологічного обладнання, стає функціонування визначається можливістю забезпечення певного рівня виробничої

потужності. Для контейнерних терміналів такою характеристикою є пропускна спроможність терміналу.

Забезпечення певного рівня пропускної спроможності терміналу базується на моніторингу та оцінці ризиків порушення сталого функціонування для подальшої розробки відповідного комплексу заходів протидії.

Постановка проблеми. На функціонування системи можна дивитися з різних точок зору – у сучасній науковій літературі розглядаються поняття «ефективне функціонування», «оптимальне функціонування», «безперебійне функціонування» та т.п. Це відповідає основним характеристикам функціонування системи, до яких відноситься ефективність, надійність, якість керування, перешкодозахищеність, стійкість і ступінь складності тощо [8, 9]. «Стале функціонування» є також одним з варіантів розгляду функціонування та пов'язано з такою характеристикою системи як «стійкість».

У сучасній літературі крім терміну «стале функціонування» використовується також термін «функціональна стійкість». Функціональна стійкість – більш комплексне поняття, яке включає в собі поняття надійності, живучості та відмовостійкості [10]. На базі аналізу джерел, можна зробити висновок про те, що термін «стале функціонування» є більш узагальнюючим для систем будь-якої природи, характеризуючи таку характеристику функціонування як «стійкість». «Функціональна стійкість» [11] є більш конкретним проявом сталого функціонування для технічних (інформаційних) систем.

Таким чином, можна стверджувати, що більшість сучасних джерел, які присвячено «сталому функціонуванню», як правило, розглядають в якості об'єкту інформаційні системи (у тому числі, керуючих систем як бортові системи літаків та кораблів [12]). Не дивлячись на те, що стале функціонування може бути застосовано для усіх видів систем, проте для підприємств, виробничих систем це майже не розглядається – але є виключення, наприклад, роботи [10, 14], хоча забезпечення необхідних параметрів функціонування є важливим для них також.

Якщо аналізувати англomовну сучасну літературу з ключовими словами «сталый розвиток» та «стале функціонування» (Sustainable operating, functioning), то сутністю відповідних досліджень є, перш за все, екологічні питання та питання економії палива, у тому числі, в транспортній сфері взагалі та портовій діяльності окремо, наприклад, [15, 16]; зменшення шуму та екологічного навантаження на місце та прилягаючі території порту визначається як забезпечення сталого функціонування порту. Таким чином, розглядаючи проблему сталого функціонування слід прийняти до уваги різницю у вітчизняної та зарубіжної термінології.

Таким чином, можна стверджувати, що питання сталого функціонування контейнерних терміналів потребують наукової уваги з урахуванням запиту практики та практичної відсутності необхідного теоретичного базису, у тому числі, для оцінки ризику порушення сталого функціонування контейнерного терміналу.

Ціль статті. Метою даного дослідження є розробка методу оцінки ризику порушення сталого функціонування техніко-технологічної системи контейнерного терміналу для моніторингу в процесах її забезпечення.

Результати. Декомпозиція пропускної спроможності терміналу. Техніко-технологічна система портового контейнерного терміналу складається з сукупності технічних засобів (перевантажувального обладнання різних категорій), які

формують технологічні лінії для проведення вантажних робіт. На пропускну здатність терміналу впливають безліч факторів:

- параметри підхідних каналів, що забезпечують введення та виведення суден із порту;
- кількість, конструкція, технічний стан та глибини діючих причалів терміналу;
- ступінь технічного оснащення (кількість, типи, вантажопідйомність перевантажувальних машин та пристроїв);
- кількість, місткість, конструкція та розташування складів;
- технологія перевантажувальних робіт тощо.

Декомпозиція пропускну спроможності контейнерного терміналу з урахуванням результатів структурно-функціонального аналізу дозволяє уявити її формування у вигляді наступної схеми (рис. 1).

Отже, пропускну спроможність терміналу $R(X, t)$ формується як поєднання продуктивностей (пропускну спроможності) технологічного обладнання причалів:

$$R(X, t) = \sum_{i=1}^n R_i(x_i, t), \quad (1)$$

де $R_i(x_i, t), i = \overline{1, n}$ – пропускну спроможність (продуктивність технологічного обладнання) i -го причалу; $x_i, i = \overline{1, n}$ – параметри, які характеризують продуктивність технологічного обладнання причалу; $\tilde{O} = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ – параметри, які характеризують елементи техніко-технологічної системи терміналу – складові технологічного обладнання. У свою чергу, продуктивність технологічного обладнання причалів залежить від продуктивності відповідного технологічного устаткування:

$$R_i(x_i, t) = C_i(x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{M_i}(t)), \quad (2)$$

де \tilde{N}_i – функція, яка описує залежність пропускну спроможності i -го причалу контейнерного терміналу від продуктивності складу технологічного обладнання та устаткування; $x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{M_i}(t)$ – кількість обладнання на i -причалі; $x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{M_i}(t)$ – відповідно, продуктивності технологічного устаткування причалу.

Таким чином, сукупність параметрів $\bigcup_{i=1}^n \{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{M_i}(t)\}$ визначає пропускну спроможність контейнерного терміналу.

Отже, з урахуванням викладеного вище, шляхом декомпозиції отримаємо наступні умови сталого функціонування портового контейнерного терміналу як техніко-технологічної системи:

$$P((R'_i(x_i^t, t) - R^f_i(x_i^f, t) \leq \Delta R'_i(t)) \geq p_{\gamma i}), \quad (3)$$

$$i = \overline{1, n}, t = 1, 2, 3, \dots, T,$$

де $R'_i, \Delta R'_i$, відповідно, планова продуктивність (пропускну спроможність) та її припустиме зменшення для i -ого причалу, R^f_i – фактична пропускну спроможність.

Умови (3) інтерпретуються наступним чином: у кожний момент часу ймовірність того, що пропускна спроможність причалу терміналу вище, ніж певний рівень $p_{\gamma i}$, який можна вважати достатнім для забезпечення сталого функціонування. В свою чергу, забезпечення виконання (3) потребує виконання аналогічних умов для параметрів, які характеризують продуктивність кожного елементу зі складу техніко-технологічного обладнання кожного причалу.

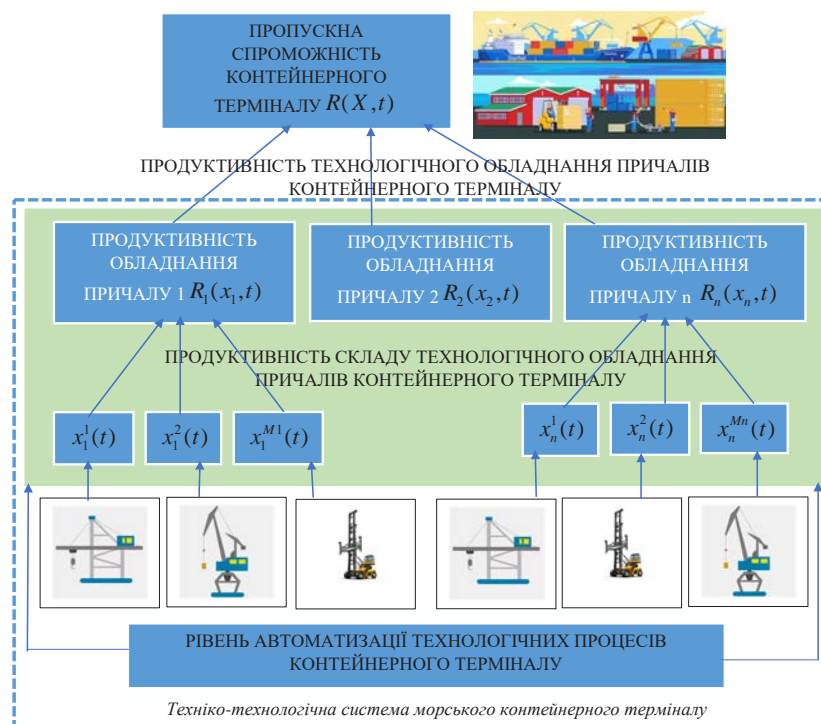


Рис. 1. Пропускна спроможність контейнерного терміналу як інтегральна характеристика відповідної техніко-технологічної системи

Слід зазначити, що ключова роль при забезпеченні певного рівня продуктивності технологічних комплексів причалів належить порталним контейнерним перевантажувачам, тому що саме вони здійснюють безпосередньо процес розвантаження/навантаження суден. Інше обладнання та устаткування має більш мобільний характер, тому, якщо для окремих їх елементів порушується стале функціонування, це, як правило, не призводить до порушення сталого функціонування технологічного комплексу причалу та терміналу у цілому. Тому для забезпечення виконання умови (2.24), перш за все, необхідним є забезпечення сталого функціонування порталних контейнерних перевантажувачів.

З урахуванням даного факту умови сталого функціонування техніко-технологічної системи контейнерного терміналу слід звзяти, не розглядаючи усі елементи, а тільки основні, у даному випадку – причальних контейнерних перевантажувачів.

Нехай серед елементів множини $\bigcup_{i=1}^n \{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{M_i}(t)\}$ виділено підмножину параметрів, які характеризують продуктивність портальних контейнерних перевантажувачів. Не обмежуючи загальності, приймаємо:

$$\bigcup_{i=1}^n \{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{L_i}(t)\} \subset \bigcup_{i=1}^n \{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{M_i}(t)\}, \quad (4)$$

де $P((x_i^k(t) - x_i^{f^k}(t)) \leq \Delta x_i^{k-1}(t)) \geq p_{ik}, k = \overline{1, L_i}, i = \overline{1, n}, t = 1, 2, \dots, T$ – кількість причальних контейнерних перевантажувачів i -го причалу. До даної множини також можна додати ще тилові контейнерні перевантажувачі, якщо вони для даного терміналу грають також вагомую роль та досить сильно впливають на пропускну спроможність терміналу. У будь якому випадку, стале функціонування терміналу на практиці залежить не від усіх складових техніко-технологічної системи, а тільки від її підмножини, яку необхідно визначити з урахування особливості терміналу.

Отже, дані умови:

$$P((x_i^k(t) - x_i^{f^k}(t)) \leq \Delta x_i^{k-1}(t)) \geq p_{ik}, k = \overline{1, L_i}, i = \overline{1, n}, t = 1, 2, \dots, T, \quad (5)$$

де $x_i^k(t)$ – планова продуктивність k -го устаткування з множини основних; $x_i^{f^k}(t)$ – фактична продуктивність k -го устаткування з множини основних; $\Delta x_i^{k-1}(t)$ – припустиме відхилення фактичної продуктивності k -го устаткування з множини основних від запланованого рівня; p_{ik} – ймовірність забезпечення необхідного рівня продуктивності.

Метод оцінки ризику порушення сталого функціонування техніко-технологічної системи терміналу. На зменшення фактичних значень параметрів

$\bigcup_{i=1}^n \{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{L_i}(t)\}$ та відповідних ймовірностей p_{ik} впливає множина факторів. Отже, під ризиком сталого функціонування морського контейнерного терміналу будемо розуміти порушення умови (5).

Для оцінки ризику порушення сталого функціонування пропонується наступний метод, якій базується на існуючих підходах для оцінки ризиків у різних сферах (наприклад, [17]), розвиваючи їх з урахуванням сутності та прийнятих критеріїв сталого функціонування, а також з врахуванням галузевої специфіки.

У відповідності до попередньої декомпозиції пропускну спроможності, оцінка ризику сталого функціонування терміналу в цілому передбачає покроковий розгляд ризику функціонування технологічного комплексу певного причалу, а також ризику функціонування певного технологічного обладнання (рис. 2) – враховуючи декомпозицію пропускну спроможності терміналу та умови його сталого функціонування. Такий підхід враховує певний вплив устаткування та причалів на загальну пропускну спроможність терміналу.

Отже, S – ризик порушення сталого функціонування контейнерного терміналу в контексті порушення сталого функціонування відповідної техніко-технологічної системи, якій формується на базі ризиків порушення сталого функціонування

технологічних комплексів причалів $S_i, i = \overline{1, n}$, що у свою чергу, є результатом композиції ризиків порушення параметрів продуктивності основних елементів технологічного комплексу причалу $S_i^k, k = \overline{1, L_i}, i = \overline{1, n}$.

Пропонується загальний ризик порушення сталого функціонування техніко-технологічної системи терміналу оцінювати як:

$$S = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot S_i, \quad (6)$$

де $\mu_i, i = \overline{1, n}$ – вага ризику порушення сталого функціонування кожного причалу у загальному ризику для терміналу у цілому. В якості даних важелів доцільним є використання частки планованої пропускної спроможності причалу $R'_i(x'_i)$ у загальній пропускній спроможності терміналу $R'(x')$ – в такий спосіб враховується диференціація впливу кожного причалу на функціонування терміналу:

$$\mu_i = \frac{R'_i(x'_i)}{R'(x')} = \frac{R'_i(x'_i)}{\sum_{i=1}^n R'_i(x'_i)}, i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

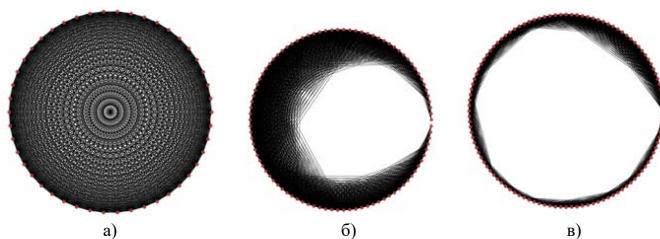


Рис. 2. Етапи оцінки ризику сталого функціонування техніко-технологічної системи терміналу

З урахуванням (7) виконується стандартна умова щодо важелів:

$$\sum_{i=1}^n \mu_i = \sum_{i=1}^n \frac{R'_i(x'_i)}{R'(x')} = 1. \quad (8)$$

В свою чергу, врахування нерівнозначності впливу кожного елементу з множини $\{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{L_i}(t)\}, i = \overline{1, n}$ також потребує введення відповідних важелів $\eta_i^k, i = \overline{1, n}, k = \overline{1, L_i}$, для яких виконується умова:

$$\sum_{k=1}^{L_i} \eta_i^k = 1, i = \overline{1, n}. \quad (9)$$

Слід зазначити, що якщо в якості основного устаткування причалу в рамках множини $\{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{L_i}(t)\}, i = \overline{1, n}$ враховуються, наприклад, тільки порталні

контейнерні перевантажувачі, то для встановлення важелів $\eta_i^k, i = \overline{1, n}, k = \overline{1, L_i}$ можна використовувати підхід, аналогічний розглянутому вище, отже:

$$\eta_i^k = \frac{x_i^{*k}}{R_i'(x_i^*)}, k = \overline{1, L_i}, i = \overline{1, n}, \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^{L_i} \eta_i^k = \frac{\sum_{k=1}^{L_i} x_i^{*k}}{R_i'(x_i^*)} = 1, i = \overline{1, n}, \quad (11)$$

якщо прийнято, що

$$R_i'(x_i^*) \approx \sum_{k=1}^{L_i} x_i^{*k} = 1, i = \overline{1, n}, \quad (12)$$

отже пропускна спроможність причалу встановлюються як сума продуктивності основного устаткування (портальний перевантажувачів). Отже, (10) враховує внесок продуктивності кожного елементу з основних у технологічному устаткуванні причалу в продуктивність – пропускну спроможність причалу.

Якщо в множині $\{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{L_i}(t)\}, i = \overline{1, n}$ присутні різноманітне устаткування, або умова (12) не виконується, то важелі $\eta_i^k, i = \overline{1, n}, k = \overline{1, L_i}$ призначаються експертним шляхом з урахуванням впливу кожного елементу на загальну продуктивність.

Ризик порушення сталого функціонування технологічного комплексу причалів у даній ситуації:

$$S_i = \sum_{k=1}^{L_i} S_i^k \cdot \eta_i^k = 1, i = \overline{1, n}. \quad (13)$$

Таким чином, формалізована інтегральна оцінка ризику порушення сталого функціонування контейнерного терміналу, яка враховує нерівнозначність впливу продуктивності основного обладнання причалів терміналу. Узагальнюючи (12) та (6), отримаємо:

$$S = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot \left(\sum_{k=1}^{L_i} S_i^k \cdot \eta_i^k \right). \quad (14)$$

Якщо важелі $\mu_i, \eta_i^k, i = \overline{1, n}, k = \overline{1, L_i}$ встановлюються у відповідності до (7) та (10), то оцінка ризику:

$$S = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot \left(\sum_{k=1}^{L_i} S_i^k \cdot \eta_i^k \right) = \sum_{i=1}^n \frac{R_i'(x_i^*)}{R'(x^*)} \left(\sum_{k=1}^{L_i} S_i^k \cdot \frac{x_i^{*k}}{R_i'(x_i^*)} \right). \quad (15)$$

Таким чином, оцінки ризику порушення сталого функціонування техніко-технологічної системи терміналу формується як інтегральна величина ризиків іншого рівня у відповідності до схеми на рис. 2.

Формування оцінок ризику порушення сталого функціонування для складових техніко-технологічної системи терміналу. Наступний етап

дослідження – встановлення безпосередньо оцінок ризику S_i^k , на яких базуються ризику інших рівнів. На рис. 3 наведено схему пропонованого методу у загальному вигляді.

Отже, серед основних факторів впливу на продуктивність елементів транспортно-технологічної системи терміналу – зовнішні та внутрішні фактори. Основні зовнішні фактори: природно-кліматичні, техногенні, доступність енергоресурсів, запасних частин тощо; основні внутрішні фактори: старіння, знос обладнання, порушення правил та норм експлуатації, порушення норм проведення ремонтів та заміни обладнання, людський фактор (помилки, некомпетентність).

Перелічені фактори не є рівнозначними, отже деякі з них мають більш суттєвий вплив, ніж інші. Наприклад, як правило, вік та знос устаткування важливіше, ніж природно-кліматичні фактори. Традиційним підходом в такій ситуації є введення важелів, які враховують «вагу впливу». Нехай $\lambda_g^z, g = \overline{1,3}$ важелі для зовнішніх факторів впливу, $\lambda_w^d, w = \overline{1,5}$ – для внутрішніх. Для вказаних важелів необхідно виконання умови:

$$\sum_{g=1}^3 \lambda_g^z + \sum_{w=1}^5 \lambda_w^d = 1 \cdot \quad (16)$$

Встановлення даних важелів має відбуватися експертним шляхом з врахуванням досвіду певного терміналу, наявної статистики, поточних умов його роботи. Також слід зазначити, що встановлену систему факторів можна розглядати більш детально, отже кожен фактор можна уявити у вигляді цілої множини, наприклад, розподілити «наявність ресурсів» за видами ресурсів. Тем не менш, слід зауважити, що ступінь деталізації факторів не впливає на подальше дослідження. Тому приймаємо систему факторів впливу як на рис. 3.

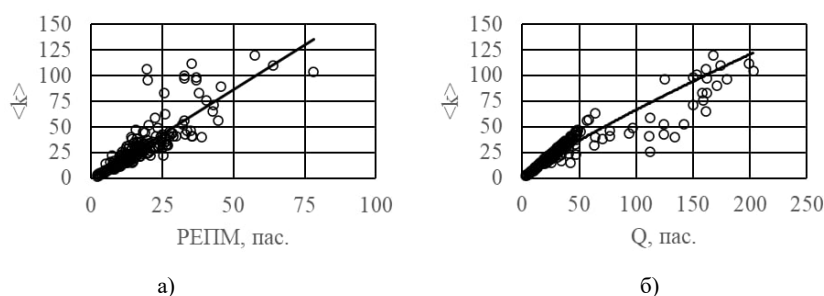


Рис. 3. Схема врахування факторів впливу для оцінки ризику порушення сталого функціонування техніко-технологічної системи морського контейнерного терміналу

На наступному кроці слід зазначити, що оцінка ризику відбувається для кож-

ної продуктивності $\bigcup_{i=1}^n \{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{L_i}(t)\}$ з множини основного устаткування, при цьому важелі вважаються однаковими за значеннями для вказаного устаткування та обладнання. Тем не менш, можливо також використовувати варіант

диференціації важелів для різних категорій обладнання, або для різних причалів терміналу, якщо існує принципова різниця в умовах їх роботи (розташування причалу, людські ресурси тощо).

Оцінка впливу кожного фактору проводиться експертним шляхом – в якості експерту має виступати спеціаліст, якій володіє інформацією щодо технічного обладнання терміналу, його експлуатації та т.п. Оцінка впливу кожного фактору:

$$0 \leq s_{ikg}^g \leq 1, g = \overline{1,3}, 0 \leq s_{ikw}^a \leq 1, w = \overline{1,5}, k = \overline{1, L_i}, i = \overline{1, n}, \quad (17)$$

де s_{ikg}^g, s_{ikw}^a – оцінки ризику впливу на продуктивність x_i^{fk} системи зовнішніх та внутрішніх факторів.

Загальна оцінка ризику з точки зору продуктивності $x_i^{fk}(t)$:

$$S_i^k = \sum_{g=1}^3 \lambda_g^g \cdot s_{ikg}^g + \sum_{w=1}^5 \lambda_w^a \cdot s_{ikw}^a, k = \overline{1, L_i}, i = \overline{1, n}. \quad (18)$$

Таким чином, поєднання схем на рис. 3.1 та 3.2 формує послідовність розрахунків для оцінки ризику сталого функціонування техніко-технологічної системи терміналу.

Для того, щоб оцінка ризику мала практичне значення, необхідним є введення «шкали ризику», яка диференціює ризик на рівні (наприклад, []). Введення такої шкали в рамках даного дослідження можливо тільки у загальному вигляді без чіткого встановлення певних значень межі різних рівнів ризику. Це обумовлюється тим, що рівні ризику залежать від суб'єктивних оцінок важелів факторів впливу, які є актуальними для певного терміналу та можуть значно відрізнитися для іншого, з урахуванням його специфіки. Тому для практичного використання запропонованого методу кожен термінал формує відповідний розподіл рівнів ризику:

$S^1 \leq S \leq 1$ – рівень ризику високий;

$S^2 \leq S < S^1$ – рівень ризику середній;

$S^3 \leq S < S^2$ – рівень ризику помітний;

$S^4 \leq S < S^3$ – рівень ризику низький.

Після ідентифікації рівня ризику та порівняння його та відповідного значення ризику для попереднього періоду часу, формуються висновки та розробляються відповідні заходи для протидії зростаючому ризику, наприклад, або для підтримки наявного рівня сталого функціонування.

Експериментальні розрахунки. Для ілюстрації розрахунків за запропонованим методом розглянемо наступний приклад. Нехай розглядається термінал, у складі якого три причали з відповідним технологічним устаткуванням. Серед основного устаткування виділено по три елементу (табл. 1).

Розрахунки важелів продуктивності устаткування $\eta_i^k, i = \overline{1,3}, k = \overline{1,4}$ та причалів $\mu_i, i = \overline{1,3}$ за формулами (7), (10) наведено у табл.3.1. Пропускна спроможність терміналу 820 тис. TEU/рік – причали відповідно мають пропускні спроможності 260, 260 та 300 тис. TEU/рік. Рис.4 ілюструє прийняті важелі λ_g^g, λ_w^a для системи факторів впливу, табл. 2 – розрахунки для причалу 2.

Таблиця 1

Результати розрахунків важелів $\eta_i^k, i = \overline{1,3}, k = \overline{1,4}, \mu_i, i = \overline{1,3}$

	Причал 1		Причал 2		Причал 3	
	$\tilde{\sigma}_1^k$	$\tilde{\sigma}_2^k$	$\tilde{\sigma}_2^k$	η_2^k	$\tilde{\sigma}_3^k$	η_3^k
k=1	50	0,19	60	0,23	80	0,27
k=2	80	0,31	60	0,23	80	0,27
k=3	80	0,31	40	0,15	60	0,20
k=4	50	0,19	100	0,38	80	0,27
Разом	260	1,00	260	1,00	300	1,00
μ_i	0,317		0,317		0,366	



Рис. 4. Порівняння прийнятих важелів λ_g^c, λ_w^a

Результати розрахунку ризиків S_2^k для причалу 2

На рис. 5 наведено оцінки ризиків щодо зменшення продуктивності устаткування за причалами $S_i, i = \overline{1,3}$, на рис.6 – оцінки ризиків порушення сталого функціонування по причалах $S_i, i = \overline{1,3}$ та для терміналу у цілому S .

Кращий показник відповідає третьому причалу, з урахуванням того, що за найбільш вагомими складовими – станом устаткування, порушеннями ремонтів, норм експлуатації – цей причал має більш низькі оцінки.

Розрахунок ризику порушення сталого функціонування терміналу відбувався у відповідності до формули (14), таким чином, отримали оцінки ризику $S = 0,148$.

Якщо прийняти в якості шкали ризику сталого функціонування наступну:

- $0,7 \leq S \leq 1$ – рівень ризику високий;
- $0,5 \leq S < 0,7$ – рівень ризику середній;
- $0,2 \leq S < 0,5$ – рівень ризику помітний;
- $0 \leq S < 0,2$ – рівень ризику низький,

то для прикладу, що розглядається, рівень ризику вважається як низький. Але для повноти висновків необхідно мати інформацію за попередні часові періоди для порівняння та встановлення динаміки.

Таблиця 2

Фактори впливу	Оцінки ризику				Оцінки ризику з урахуванням важелів			
	$S_{21g}^{\xi,\hat{a}}$	$S_{22g}^{\xi,\hat{a}}$	$S_{23g}^{\xi,\hat{a}}$	$S_{24g}^{\xi,\hat{a}}$	$\lambda_{11g}^{\xi,\hat{a}} \cdot S_{11g}^{\xi,\hat{a}}$	$\lambda_{12g}^{\xi,\hat{a}} \cdot S_{12g}^{\xi,\hat{a}}$	$\lambda_{13g}^{\xi,\hat{a}} \cdot S_{13g}^{\xi,\hat{a}}$	$\lambda_{14g}^{\xi,\hat{a}} \cdot S_{14g}^{\xi,\hat{a}}$
Природно-кліматичні	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Техногенні	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Доступність ресурсів	0,2	0,2	0,15	0,15	0,02	0,02	0,015	0,015
Старіння, знос обладнання	0,3	0,3	0,8	0,5	0,06	0,06	0,16	0,1
Порушення правил та норм експлуатації	0,2	0,2	0,1	0,1	0,05	0,05	0,025	0,025
Порушення норм проведення ремонтів	0,05	0,05	0,05	0,05	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125
Людський фактор	0,1	0,05	0,1	0,05	0,01	0,005	0,01	0,005
Разом					0,1535	0,1485	0,2235	0,1585

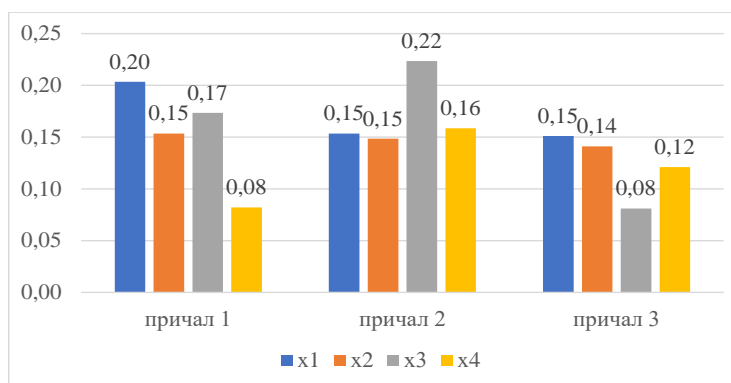


Рис. 5. Оцінки ризиків щодо зменшення продуктивності устаткування за причалами S_i^k

В процесі експериментальних розрахунків здійснювалось варіювання вхідними даними для аналізу впливу змін на результати оцінки ризику. Отже, результати експериментальних розрахунків за запропонованим методом дозволяють зробити висновок про те, що результати оцінки відповідним чином реагують на зміни вхідних даних; результати складають практичний інструмент оцінки ризику та надають наочний погляд на ситуації з ризиком порушення сталого функціонування техніко-технологічної системи терміналу з точки зору окремих елементів даної системи.

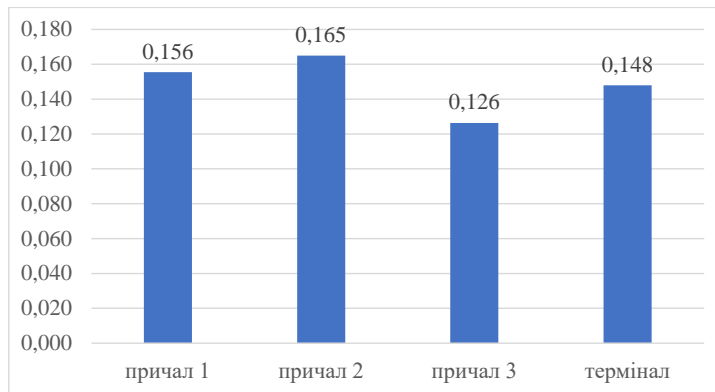


Рис. 6. Оцінки ризику порушення сталого функціонування причалів S_i та терміналу S

Висновки. Запропоновано метод оцінки ризику порушення сталого функціонування контейнерного терміналу у контексті його техніко-технологічної системи. Оцінка ризику сталого функціонування терміналу в цілому передбачає покроковий розгляд ризику функціонування технологічного комплексу певного причалу, а також ризику функціонування певного технологічного обладнання – враховуючи декомпозицію пропускну спроможності терміналу та умови його сталого функціонування. Такий підхід враховує певний вплив устаткування та причалів на загальну пропускну спроможність терміналу. Запропонований метод базується на існуючих підходах для оцінки ризиків у різних сферах, розвиваючи їх з урахуванням сутності та прийнятих критеріїв сталого функціонування, а також у прикладному напрямку з врахуванням галузевої специфіки при формуванні системи факторів впливу, а також при формалізації важелів елементів (устаткування) та підсистем (причалів) у структурі загального (інтегрального) ризику порушення сталого функціонування терміналу. Проведено відповідні експериментальні розрахунки з метою перевірки працездатності запропонованого методу та його достовірності.

Слід зазначити, що даний метод є універсальним, і може бути використаний для оцінки ризику порушення сталого функціонування техніко-технологічних систем різних за спеціалізацією терміналів з врахуванням відповідної специфіки при визначенні множини устаткування та їх впливу на загальну пропускну здатність.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kyrylova O., Kyrylova V. The oretical foundations of spatial and functional evolution of ports. *Транспортні системи і технології*. 2022. 1. 170-189. DOI: 10.32703/2617-9040-2022-40-15.
2. Решетков Д.М., Онищенко С. П., Павлова Н. Л., Кириллова В. Ю. Сутність, переваги та проблеми автоматизації контейнерних терміналів морських портів. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2023. Том 34 (73) № 2. С. 194–202. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.2.2/33

3. Kon W.K., Rahman N.S., Hanafiah R.M. Hamid S.A. The global trends of automated container terminal: A systematic literature review. *Maritime Business Review*. 2020. 6. P. 206–233
4. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю., Магамадов О.Р., Ромах В.Л. Smart port: новітні технології і міжнародний досвід їх упровадження. *Transport development*. 2024. С.62-74. DOI: 10.33082/td.2024.2-21.06.
5. Onishchenko O., Golikov V., Melnyk O., Onyshchenko S., Obertiur K. Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022, 116, DOI: 10.20858/sjsutst.2022.116.14
6. Бондаренко Ю. А., Онищенко С. П. Структура та невизначеність контейнеропотоків у системі морських перевезень. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, Том 35 2024. (74), № 1. С. 139-146.
7. Берестенко В., Онищенко С. Ймовірнісні характеристики мультимодальної доставки. *Розвиток транспорту*. 2021. Vol. 1(12), P. 118-128 DOI: 10.33082/td.2022.1-12.10
8. Гнатієнко О., Дружинін В. Сучасні тенденції забезпечення функціональної стійкості складних організаційних систем. *Управління розвитком складних систем*. 2025. (60), 13–17. DOI: 10.32347/2412-9933.2024.60.13-17
9. Висоцька І.Б. Теоретичні підходи до поняття «стійкість системи». *Науковий вісник Львівського державного університету внутрішніх справ. Серія економічна*. 2017. Випуск 2. С. 13-23.
10. Mogylevych D. , Sboiev R. Analysis of functional safety of electronic communication system equipment. *Collection Information technology and security*. 2023. N11. 96-105. DOI: 10.20535/2411-1031.2023.11.1.283816.
11. Барабаш О., Макарчук А., Саланда І. Дослідження ймовірнісного показника функціональної стійкості розподілених інформаційних систем. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2024. N1. С. 45–50. DOI: 10.31891/2219-9365-2024-77-6
12. Собчук В.В. Основи забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем підприємств в умовах впливу дестабілізуючих факторів: монографія / В.В. Собчук, О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко. К: Міленіум. 2022. 272 с.
13. Калашник Г., Калашник-Рибалко М. Ознаки та критерії функціональної стійкості інтегрованого комплексу бортового обладнання сучасного повітряного судна та перспективні напрямки його розвитку. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2021. С. 7-15. DOI: 10.30748/zhups.2021.68.01.
14. Мелешенко К. Забезпечення сталого функціонування вантажопасажирських поромів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук: спец. 05.22.01 / К. Мелешенко; Одес. нац. мор. ун-т. – О., 2018. – 27 с.
15. Haraldson, Sandra & Lind, Mikael & Raza, Zeeshan & Woxenius, Johan & Olindersson, Fredrik. The concept of the sustainable port -ports becoming

- enablers of sustainability in transports and logistics. 2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.35250.99526.
16. Hossain, Tahazzud & Adams, Michelle & Walker, Tony. Role of sustainability in global seaports. *Ocean & Coastal Management*. 2021. 202. DOI: 105435. 10.1016/j.ocesoaman.2020.105435.
17. Бичковський Ю.В., Онищенко С.П. Оцінка безпеки при проектно-орієнтованому управлінні безпекою в судноплаванні з урахуванням впливу індивідуальних факторів людського елемента. *Наукові інновації та передові технології*, 2025. 3(31), 381-393. DOI: 10.52058/2786-5274-2024-3(31)-381-393.

REFERENCES

1. Kyryllova O., Kyryllova V. The oretical foundations of spatial and functional evolution of ports. *Transport systems and technologies*. 2022. 1. 170-189. DOI: 10.32703/2617-9040-2022-40-15. [in Ukrainian]
2. Reshetkov D.M., Onyshchenko S. P., Pavlova N. L., Kyryllova V. Y . The essence, advantages and problems of automation of container terminals of sea ports. [Sutnist', perevahy ta problemy avtomatyzatsiyi konteynernykh terminaliv mors'kykh portiv]. *Scientific notes of the Tavria National University V.I. Vernadsky [Vcheni zapysky Tavriys'koho natsional'noho universytetu imeni V.I. Vernads'koho. Seriya: Tekhnichni nauky]*. 2023. 34 (73) № 2. P. 194–202. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.2.2/3[in Ukrainian]
3. Kon W.K., Rahman N.S., Hanafiah R.M. Hamid S.A. The global trends of automated container terminal: A systematic literature review. *Maritime Business Review*. 2020. 6. P. 206–233
4. Kirillova O.V., Kirillova V.Yu., Magamadov O.R., Romakh V.L. Smart port: latest technologies and international experience of their implementation. [Smart port: novitni tekhnolohiyi i mizhnarodnyy dosvid yikh uprovadzhennya] *Transport development*. 2024. P.62-74. DOI: 10.33082/td.2024.2-21.06. [in Ukrainian]
5. Onishchenko O., Golikov V., Melnyk O., Onyshchenko S., Obertiur K. Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022, 116, DOI: 10.20858/sjsutst.2022.116.14
6. Bondarenko Yu. A., Onyshchenko S. P. Structure and uncertainty of container flows in the maritime transport system [Struktura ta nevyznachenist' konteyneropotokiv u systemi mors'kykh perevezen'] *Academic notes of the Tavri National University V.I. Vernadskyi, Series: Technical Sciences, Volume 35 (74), No. 1, 2024, pp. 139-146. [in Ukrainian]*
7. Berestenko V., Onyshchenko S. Probability characteristics of multimodal delivery [Ymovirnisni kharakterystyky mul'tymodal'noyi dostavky]. *Transport development*. 2021. Vol. 1(12), P. 118-128 DOI: 10.33082/td.2022.1-12.10 [in Ukrainian]
8. Hnatienko O., Druzhynin V. Modern trends in ensuring the functional stability of complex organizational systems [Suchasni tendentsiyi zabezpechennya funktsional'noyi stiykosti skladnykh orhanizatsiynykh

- system]. Management of the development of complex systems. 2025. (60), 13–17. DOI: 10.32347/2412-9933.2024.60.13-17 [in Ukrainian]
9. Vysotska I.B. Theoretical approaches to the concept of "system stability" [Teoretychni pidkhody do ponyattya «stiykist' systemy»] []. Scientific Bulletin of the Lviv State University of Internal Affairs. Economic Series. 2017. Issue 2. P. 13-23 [in Ukrainian]
 10. Mogylevych D. , Sboiev R. Analysis of functional safety of electronic communication system equipment. Collection Information technology and security. 2023. N11. 96-105. DOI: 10.20535/2411-1031.2023.11.1.283816.
 11. Barabash O., Makarchuk A., Salanda I. Research of the probabilistic indicator of the functional stability of distributed information systems [Doslidzhennya ymovirnisnogo pokaznyka funktsional'noyi stiykosti rozpodilenykh informatsiynykh system]. Measuring and computing devices in technological processes. 2024. N1. C. 45–50. DOI: 10.31891/2219-9365-2024-77-6 [in Ukrainian]
 12. Sobchuk V.V. Fundamentals of ensuring the functional stability of information systems of enterprises under the influence of destabilizing factors: monograph [Osnovy zabezpechennya funktsional'noyi stiykosti informatsiynykh system pidpryemstv v umovakh vplyvu destabilizuyuchykh faktoriv:] / V.V. Sobchuk, O.V. Barabash, A.P. Musienko. K: Millennium. 2022. 272 p. [in Ukrainian]
 13. Kalashnik G., Kalashnik-Rybalko M. Signs and criteria of functional stability of the integrated complex of on-board equipment of a modern aircraft and promising directions of its development [Oznaky ta kryteriyi funktsional'noyi stiykosti intehrovanoho kompleksu bortovoho obladnannya suchasnogo povitryanoho sudna ta perspektyvni napryamky yoho rozvytku.]. Collection of scientific papers of the Kharkiv National University of the Air Force. 2021. S. 7-15. DOI: 10.30748/zhups.2021.68.01 [in Ukrainian]
 14. Meleshenko K. Ensuring sustainable operation of cargo-passenger ferries [Zabezpechennya staloho funktsionuvannya vantazhohopasazhyr'skykh poromiv:]: autoref. thesis for obtaining sciences. degree of doctor of technology Sciences: specialist 05.22.01 / K. Meleshenko; Odessa national plague Univ. – O., 2018. – 27 p. [in Ukrainian]
 15. Haraldson, Sandra & Lind, Mikael & Raza, Zeeshan & Woxenius, Johan & Olindersson, Fredrik. The concept of the sustainable port -ports becoming enablers of sustainability in transports and logistics. 2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.35250.99526.
 16. Hossain, Tahazzud & Adams, Michelle & Walker, Tony. Role of sustainability in global seaports. *Ocean & Coastal Management*. 2021. 202. DOI: 105435. 10.1016/j.ocecoaman.2020.105435.
 17. Bychkovsky Y.V., Onyshchenko S.P. Safety assessment in project-oriented safety management in shipping taking into account the influence of individual factors of the human element [Otsinka bezpeky pry proyektno-oriyentovanomu upravlinni bezpekoyu v sudnoplavstvi z urakhuvannyam vplyvu indyvidual'nykh faktoriv lyuds'koho elementa]. Scientific Innovations and Advanced Technologies, 2025. 3(31), 381-393. DOI: 10.52058/2786-5274-2024-3(31)-381-393. [in Ukrainian].

**КОНТЕЙНЕРНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ПОРОМНИМ СПОЛУЧЕННЯМ
У ЧОРНОМУ МОРІ ЯК ЧАСТИНА ТРАНСКАСПІЙСЬКОГО
МІЖНАРОДНОГО ТРАНСПОРТНОГО МАРШРУТУ**

В.І. Літвяк¹, О.В. Щербина²

¹здобувач ступеню доктор філософії
кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень»,
Одеський національний морський університет,
Одеса, Україна,

ORCID ID: 0009-0000-6261-927X

²к.т.н., доцент кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,

ORCID ID: 0000-0002-9247-5972

Анотація

Вступ. Контейнеропотік між Східною Азією та Європейським Союзом є одним з найбільших за об'ємом. Широкомасштабне російське вторгнення в Україну призвело до зменшення популярності так званого «Північного коридору» – транспортної системи, що сполучає Китай з країнами ЄС, та вимусило вантажовласників обирати альтернативні шляхи доставки. Транскаспійський міжнародний транспортний маршрут знову привернув до себе увагу, як мультимодальний шлях доставки вантажів з Китаю до ЄС. Цей маршрут, який проходить через декілька країн Середньої Азії, на сьогоднішній день є потенційною альтернативою для наземного логістичного ланцюга перевезення вантажів, який раніше йшов по території росії. Однією з ланок даного шляху є морське перевезення вантажів з портів Грузії/Туреччини до морських портів східного берегу Чорного моря. Одним з варіантів такого маршруту є поромне сполучення між грузинськими та турецькими портами з портом Чорноморськ. **Мета.** Метою статті є огляд контейнерних вантажопотоків, що рухаються по Транскаспійському міжнародному транспортному маршруту, та аналіз перспектив використання поромних перевезень у ланцюгу доставки вантажів. **Результати.** Аналіз перевезень довів, що Транскаспійський міжнародний транспортний маршрут представляє для України дуже перспективну схему доставки вантажів з Китаю, а також транзитних перевезень на напрямку Східна Азія-ЄС. Незважаючи на конкуренцію портів Румунії та Болгарії, залізничні поромні перевезення з Грузії до порту Чорноморськ мають певні переваги і потенціал розвитку. **Висновки.** Залізничні поромні перевезення контейнерів за напрямом Батумі/Поті-Чорноморськ дозволять українській транспортній системі долучитись до Транскаспійського міжнародного транспортного маршруту, та переведуть частину контейнерного вантажопотоку між Китаєм та ЄС через територію України. Незважаючи на це, такий вид сполучення має певні недоліки, які вимагають більш докладного порівняння з традиційним контейнерним перевезенням суднами-фідерами.

Ключові слова: контейнерні перевезення, пором, Транскаспійський міжнародний транспортний маршрут, логістика, доставка вантажів.

CONTAINER TRANSPORTATION BY FERRY IN THE BLACK SEA AS PART
OF THE TRANS-CASPIAN INTERNATIONAL TRANSPORT ROUTE

V.I. Litviak¹, O.V. Shcherbyna²

¹PhD seeker of the Department “Fleet operation and shipping technologies”,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0000-6261-927X

²PhD, Associate Professor at the Department “Fleet operation and shipping technologies”,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-9247-5972

Summary

Introduction. The container traffic between East Asia and the European Union is one of the largest in terms of volume. The large-scale Russian invasion of Ukraine has led to a decline in the popularity of the so-called “Northern Corridor” – a transport system connecting China with the EU countries, and has forced cargo owners to choose alternative delivery routes. The Trans-Caspian international transport route has again attracted attention as a multimodal route for delivering goods from China to the EU. This route, which passes through several Central Asian countries, is currently a potential alternative to the land logistics chain for transporting goods from China to the EU, which previously ran through the territory of Russia. One of the links of this route is the sea transportation of goods from the ports of Georgia/Turkey to the seaports of the eastern coast of the Black Sea. One option for such a route is a ferry connection between Georgian and Turkish ports with the port of Chornomorsk. **Purpose.** The purpose of the article is to review container cargo flows moving along the Trans-Caspian international transport route and analyze the prospects for using ferry transportation in the cargo delivery chain. **Results.** The analysis of transportation has proven that the Trans-Caspian international transport route represents a very promising scheme for Ukraine for the delivery of goods from China, as well as transit transportation between East Asia and the European Union. Despite the competition from the ports of Romania and Bulgaria, rail ferry transportation from Georgia to the port of Chornomorsk has certain advantages and development potential. **Conclusions.** Rail ferry transportation of containers in the direction of Batumi/Poti-Chornomorsk will allow the Ukrainian transport system to join the functioning of the Trans-Caspian international transport route and will transfer part of the container cargo flow between China and the EU through the territory of Ukraine. Despite this, this type of connection has certain disadvantages that require a more detailed comparison with traditional container transportation by feeder vessels.

Key words: container shipping, ferry, Trans-Caspian international transport route, logistics, cargo delivery.

Вступ. Морські контейнерні перевезення є одним з найбільш розповсюджених способів доставки вантажів у світі. Універсальність та великі об’єми цього виду перевезень дозволяють вантажовласникам доставляти вантажі на великі відстані за відносно низькими цінами.

На сьогоднішній день, один з найбільших контейнерних вантажопотоків іде за маршрутом Китай-ЄС. За інформацією UNCTAD, за напрямком Східна Азія-Європа лише морським транспортом було перевезено приблизно 23 млн TEU [1].

Одним з типових маршрутів перевезень вантажів на цьому напрямку до нещодавнього часу був Північний маршрут, але у зв'язку з виключенням російського сектора з логістичного ланцюга доставки вантажів з Китаю до ЄС, нагальним стало питання пошуку альтернативних маршрутів перевезень контейнерів. Однією з таких альтернатив є Транскаспійський міжнародний транспортний маршрут (ТМТМ). Цей мультимодальний логістичний шлях з'єднує країни ЄС з Китаєм транспортним коридором, який проходить через Грузію, Туреччину, Азербайджан та Казахстан. Україна може бути однією з ключових ланок цього транспортного ланцюга, оскільки контейнери з портів Грузії та Туреччини на їх шляху до європейських країн необхідно перевозити морським транспортом через Чорне море.

Постановка проблеми. У зазначених раніше умовах доцільним є розгляд використання поромного сполучення для перевезення контейнерів, що рухаються ТМТМ. У морських портах, що є частиною цього коридору (Чорноморськ, Батумі, Поті, Самсун) існує інфраструктура, яка підходить для організації контейнерних перевезень поромами. На даний момент ці умови не використовуються у логістичному ланцюгу Китай-ЄС, тож доцільною є оцінка перспективності їх залучення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Потенціал використання Транскаспійського міжнародного транспортного маршруту як альтернативи існуючим шляхам перевезень між ЄС та Китаєм розглядається дослідниками вже декілька років. Разом з початком повномасштабного вторгнення на територію України ця тема стала більш актуальною, що призвело до збільшення її наукових досліджень у контексті різних видів вантажів, а також доставки вантажів за різними географічними напрямками. Перспективи вантажних перевезень ТМТМ досліджували Т. Kenderdine, P. Bucsky, N. Miholjicic, G. Chankov, A. Garibov, R. Palu, O.-P. Hilmola, Ж. Медеубаєва, Р. Таштемханова, А. Тугаєв та ін.

Вітчизняні науковці також досліджують функціонування української транспортної системи у складі ТМТМ як у комплексних оглядах транзитних перевезень територією України, так і у рамках можливої співпраці з країнами Кавказу та Середньої Азії у транспортній сфері. Серед цих досліджувачів варто відзначити Г. С. Прокудіна, О. А. Чупайленка, А. А. Маніскевича, А. В. Просянюка, П. І. Затону.

Дослідження контейнерних перевезень з використанням поромів є менш популярною темою для досліджень, проте робота Л. В. Ширяєвої та М. В. Шагіної [2] розглядає поромні перевезення контейнерів саме у чорноморському басейні.

Метою статті є огляд стану вантажних і, зокрема, контейнерних перевезень за Транскаспійським міжнародним транспортним маршрутом та аналіз перспектив використання залізничних поромів у якості ланки мультимодального перевезення контейнерних вантажів у Чорному морі.

Виклад основного матеріалу. Транскаспійський міжнародний транспортний маршрут, або Середній коридор – це маршрут перевезення вантажів, що сполучає ЄС і Китай. Ідея ТМТМ була вперше запропонована в 2013 р. у рамках II Міжнародного транспортно-логістичного бізнес-форуму «Новий Шовковий шлях» в Казахстані, де головами національних залізниць Казахстану, Азербайджана та Грузії була підписана угода про започаткування Координаційного комітету з розвитку ТМТМ. Згодом, у 2014 році було створено комітет, до якого увійшли транспортні організації, які забезпечують морські перевезення у Каспійському морі.

Сьогодні цей логістичний ланцюг включає у себе 10 тисяч кілометрів залізничних шляхів і 9 морських портів та пролягає через Казахстан, Каспійське море, Азербайджан, Грузію, Туреччину, Болгарію, Румунію та Україну (рис. 1). Крім цього, він є географічно найкоротшим шляхом доставки вантажів між Китаєм та ЄС. За оцінкою Міжнародної асоціації «Транскаспійський міжнародний транспортний маршрут», маршрут має потенційну пропускну спроможність у 10 млн. тон вантажів і до 200 тис. контейнерів на рік [3].



Рис. 1. Транскаспійський міжнародний транспортний маршрут на мапі [3]

Як вже було зазначено, ТМТМ представляє альтернативу двом існуючим транспортним шляхам, які поєднують країни ЄС з Китаєм. Перший – Північний маршрут, сьогодні втратив значні об’єми перевезень у зв’язку з введенням санкцій у бік російської федерації, що обмежило можливість транзитних перевезень через її територію. Другий маршрут – морське перевезення через Суецький канал, яке також має певні недоліки. Тарифи перевезення на ньому схильні до раптових підвищень через вплив багатьох факторів, таких як надмірна завантаженість портів та Суецького каналу, підвищення цін на паливо, нестача контейнерів, небезпека судноплавства у регіоні Червоного моря та ін. Так, у зв’язку з перевантаженістю портів Середземномор’я та порушеннями роботи суден, пов’язаними з атаками єменських хуситів, тарифи на перевезення зросли до 5.5 тис. дол. США за один TEU [1].

На фоні цього, ТМТМ виглядає перспективною заміною, проте і він має свої недоліки. Наразі, ТМТМ далекий до рівня розвитку та організації наявних логістичних ланцюгів доставки контейнерів між Китаєм та країнами ЄС. Проблеми, які викликані відсутністю централізованого керуючого органу, підсилюються вищою, у порівнянні з іншими шляхами, складністю перевезень (перетин декількох міжнародних кордонів, використання різних видів транспорту) [4]. На даний момент, зазначені недоліки призводять до підвищення тарифів перевезення та вимушують вантажовласників обирати інші шляхи доставки вантажів.

Незважаючи на це, організації, які зацікавлені у розвитку та функціонуванні ТМТМ шляхом співпраці та стабільних інвестицій у інфраструктуру, продовжують підвищувати ефективність цього маршруту.

В основному, об'єктом інвестицій є ділянка переправлення вантажів через Каспійське море. У 2017 році був запущений в експлуатацію міжнародний морський поромний комплекс у порту Курик. Він розташований південніше порту Актау та сполучає казахстанську залізницю з азербайджанським портом Алят, який є спеціалізованим поромним терміналом порту Баку.

У квітні 2019 року був запущений фідерний сервіс Актау-Баку, який збільшив річні обсяги контейнерних перевезень ТМТМ на 71%. Задля заохочення вантажовласників, асоціацією «ТМТМ» були зменшені комплексні ставки на контейнерні перевезення на 60-70% від базових ставок. Також, влада Казахстану планує створити контейнерний хаб у спеціальній економічній зоні морського порту Актау та побудувати власний поромний флот. Окрім того, ТМТМ залучає до свого розвитку іноземні інвестиції – Європейський банк реконструкції та розвитку інвестуватиме до 104 млн дол. у випуск облігацій НК «Казахстан темир жолы» (залізниця Казахстану) для підвищення фінансової стійкості оператора та модернізації ТМТМ [5]. Ці зусилля вплинули на появу позитивних тенденцій у використанні ТМТМ. Так, лише за 11 місяців 2024 р. цим шляхом перевезли більше 50 тис. TEU, що майже вдвічі перевищує річні показники до цього [6] (рис. 2).

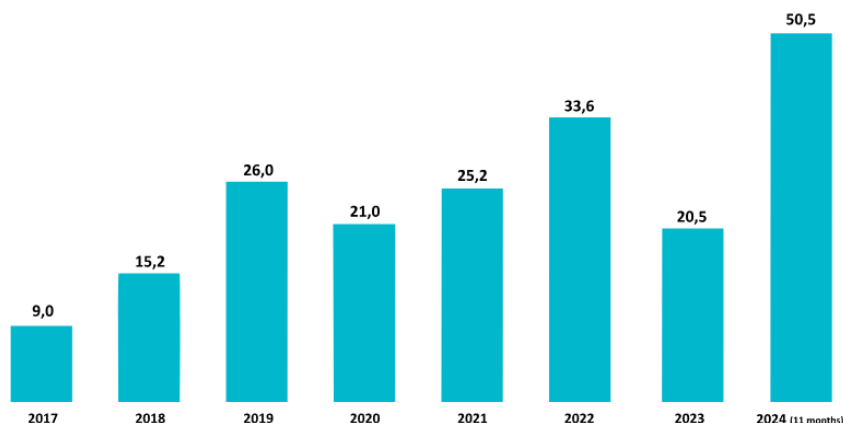


Рис. 2. Річний об'єм контейнерних перевезень по ТМТМ (тис. TEU) [6]

Зростання вантажопотоків вказують на зацікавленість вантажовласників у доставці вантажів саме цим шляхом. Подальший розвиток транспортної інфраструктури, діджиталізація та гармонізація митної справи у країнах, по територіям яких проходить ТМТМ, спростить процес перевезення та знизить тарифи перевезень, що дозволить залучити ще більші об'єми вантажів. За прогнозом Групи Світового банку [7] до 2030 р. загальні об'єми перевезень по Середньому коридору зростуть більше ніж у три рази, при чому частка контейнерних вантажів сягне 35,8%, у порівнянні з 22,7% у 2021 р.

Слід зазначити, що українська сторона приймала участь в організації ТМТМ ще з початку її функціонування. Укрзалізниця досі є одним з постійних членів асоціації, а також один з перших контейнерних потягів «Nomad Express» рухався за маршрутом Чорноморськ-Достик. Для України вкрай перспективною є участь

в цьому логістичному ланцюгу – не тільки у якості транзитної ланки, що може принести значні доходи для держави, а й як фінальне призначення вантажів.

У 2024 р. Китай був найбільшим імпортером та одним за найбільших експортерів товарів для України [8]. Незважаючи на те, що загальна кількість перевезеного вантажу за останні роки знизилась (табл. 1), що пов'язано з загальним зменшенням об'ємів зовнішньоекономічної діяльності, вантажопотік між Україною та Китаєм все одно потребує вдосконалення систем доставки вантажів – як імпортерських, так і експортерських.

Таблиця 1

**Вантажні перевезення між Україною та деякими державами
протягом 2021–2023 рр., млн. т [9]**

Країни	Роки		
	2021	2022	2023
КНР	35,6	12,4	11,5
Туреччина	14,3	9,3	9,4
Казахстан	3,8	0,9	0,4
Іспанія	6	5,7	9,6
Чехія	6,4	5,6	4,8
США	5,6	2	1,2
Сполучене Королівство	1,9	0,7	0,6
Швейцарія	2,4	0,5	0,5
Австралія	0,6	0,6	0,2
Канада	0,2	0,1	0,1
Японія	1,2	0,4	0,1

Розглядаючи потенціал залучення української транспортної системи до перевезення контейнерних вантажів по ТМТМ, слід мати на увазі, з якими альтернативними шляхами вона має конкуренцію. Так, після переправлення через Каспійське море, транспортний ланцюг приходить до розвилки. Перший варіант подальшого перевезення – транспортування контейнерів до портів Туреччини, де, здебільшого, вони перевантажуються на фідерні контейнеровози або пороми та відправляються до портів країн ЄС. Ця схема доставки не є конкурентною для схеми доставки через Україну, оскільки остаточним призначенням в основному є південні країни ЄС (Іспанія, Італія, Хорватія, Греція та ін.) і транспортування вантажів до них через територію України не є доцільним. За другим варіантом перевезення, контейнери перевозяться залізницею від порту Баку до грузинських портів Батумі або Поті. У цьому випадку, з'являється вибір, до якого з портів на заході Чорного моря відправити вантаж: болгарського Бургасу, румунської Констанці або українського Чорноморська. У разі перевезення контейнерів фідерними суднами, український порт значно програє своїм конкурентам – інші порти мають набагато більші потужності та при цьому транспортна інфраструктура Румунії та Болгарії краще пов'язані з іншими країнами ЄС.

Попри це, існує варіант перевезення, при якому українські порти потенційно мають перевагу – перевезення залізничними поромами. Особливістю української транспортної системи у порівнянні з системами інших європейських країн є використання колій шириною 1520 мм – такої самої, як і інших країн ТМТМ

(Казахстан, Азербайджан, Грузія), на відміну від колії шириною 1435 мм європейського стандарту. Це означає, що використання залізничних поромів на напрямку Чорноморськ-Багумі/Поті дозволяє безперевантажувальне перевезення контейнерних вагонів по Чорному морю. Це значно скорочує час рейсу судна та позбавляє ризику перенавантаження портових терміналів через довгу тривалість вантажних операцій.

На даний момент двома працюючими суднами, які можуть бути використані при цьому типі сполучення, є автомобільно-залізничні пороми «Vilnius» та «Kaunas», що оперуються судноплавною компанією «Укрферрі» в акваторії Чорного моря. Ці судна можуть перевозити відповідно 50 та 49 універсальних залізничних вагонів [10], що аналогічно 100 та 98 TEU на фітинговій платформі в один ярус. Вантажомісткість цих поромів очевидно замала для освоєння навіть частини вантажопотоку в 50 тис. TEU, особливо зважаючи на найменший час рейсу в 5 діб.

Крім цього, у власності Фонду держмайна України знаходиться два суто залізничних пороми «Герої Плевни» та «Герої Шипки», які з 2015 р. належали Укрзалізниці. Саме ці пороми планували використовувати для контейнерного потягу «Nomad Express». Проте, на жаль, судна не використовувались довгий час через брак оператора, оскільки Укрзалізниця не спеціалізувалася в оперуванні морським флотом [11]. Вагономісткість цих поромів значно більша за вище згаданих – вони можуть загалом умістити до 124 вагонів на верхній та головній палубі (табл. 2), що відповідає 248 TEU в один ярус. Втім, важливо зазначити, що ці пороми можуть бути не готові для експлуатації через довгий час бездіяльності.

Таблиця 2

Розміщення вагонів на верхній та головній палубах поромів «Герої Плевни» та «Герої Шипки» [2]

	Верхня палуба		Головна палуба	
	довжина колії, м	місткість, вагонів	довжина колії, м	місткість, вагонів
Центральні колії	180	13	183	13
2 центральні бортові колії	358	26	350	24
2 бортові колії	344	24	346	24
Всього вагонів, шт.	–	63	–	61

У разі забезпечення поромного сполучення необхідним флотом, подальшу доставку контейнерів у країни ЄС можна забезпечити завдяки українській інфраструктурі мультимодальних перевезень. На шляху на захід залізниця веде до багатьох «сухих» портів – сухопутних контейнерних терміналів, які дозволяють перехід контейнерних потягів на колію європейського стандарту (рис. 3).

Наприклад, один з найбільших терміналів – Контейнерний термінал Мостиська, який має проектну потужність у 100 тис. TEU на рік, обладнаний коліями широкого та вузького стандартів. У майбутньому компанія-оператор планує подвоїти потужність терміналу. Альтернативно, контейнерні потяги можуть йти за напрямком через прикордонну залізничну станцію Ізов та до польської станції Славкув, до якої з території прокладена широка колія (1520 мм).

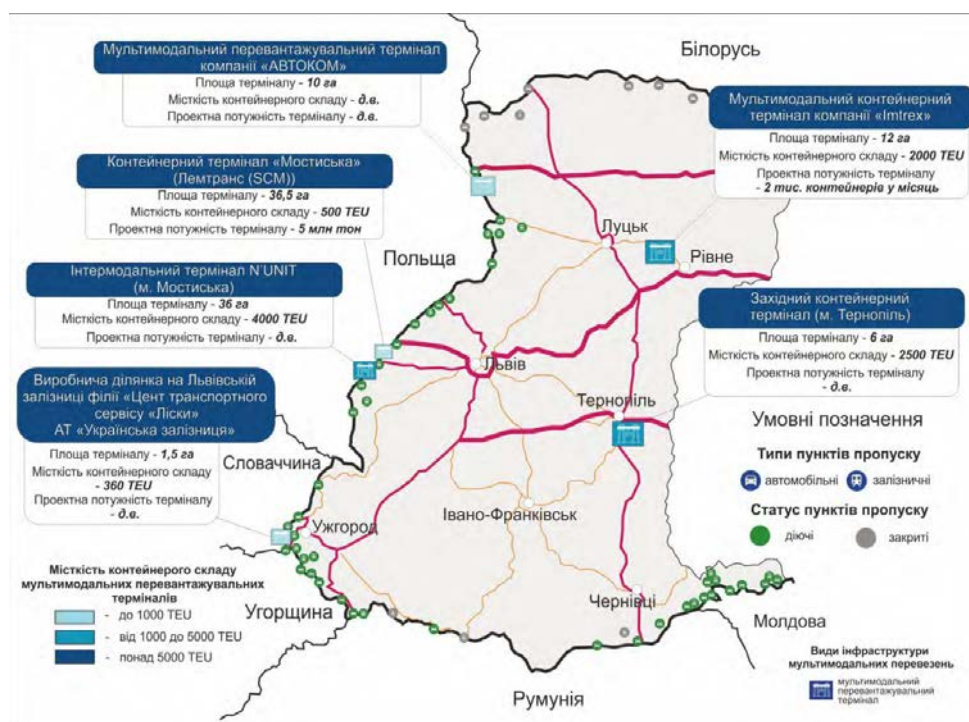


Рис. 3. Інфраструктура сухопутних мультимодальних вантажних перевезень у західній Україні, станом на початок 2023 р. [12]

При цьому, поромне перевезення контейнерів у Чорному морі має ряд недоліків, які зважатимуть конкуренції з традиційним морським перевезення контейнерів, а саме:

- висока вартість перевезень у порівнянні з фідерним сполученням;
- менша вантажомісткість суден;
- обмежена кількість поромів.

Висновки. Транскаспійський міжнародний транспортний маршрут має значний потенціал стати одним з основних шляхів доставки вантажів, в тому числі контейнерів, з Китаю до країн ЄС. У цих умовах, Україні необхідно активізуватися для того, щоб мати можливість ефективно брати участь у цьому транспортному ланцюзі. Так, важливою метою є подолання конкуренції з боку чорноморських портів Румунії та Болгарії на ділянці морського перевезення контейнерів з країн Кавказу.

Основною проблемою такого логістичного маршруту наразі є відносно висока вартість та невисока зацікавленість вантажовласників. Для її вирішення українській стороні необхідно поглибити співпрацю з компаніями-учасникам асоціації «ТМТМ». Це зможе допомогти у формуванні меншого єдиного тарифу на перевезення та у пошуку клієнтури.

Щодо безпосередньо перевезення контейнерних вантажів у Чорному морі на залізничних поромках, ця тема потребує більш детального дослідження. Рациональним є проведення порівняння економічної ефективності поромного сполучення з аналогічним фідерним сервісом, а також зіставлення перспектив інвестицій у поромні перевезення та морські контейнерні термінали у портах України.

ЛІТЕРАТУРА

1. Конференція ООН з торгівлі та розвитку. Review of maritime transport 2024: Navigating maritime chokepoints. 2024. URL: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2024_en.pdf (дата звернення: 17.01.25).
2. Л.В. Ширяєва, М.В. Шагіна. Аналіз можливостей використання залізничних поромів СК «Укрферрі» для перевезення контейнерів. *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті*. Одеса, 2017. №1 (58). С. 75-89.
3. Офіційний веб-сайт Middle Corridor – TITR. URL: <https://middlecorridor.com/en/about-the-association/history-en> (дата звернення: 17.01.25).
4. Економічна і соціальна рада ООН. Progress update on the operational capacity of the TransCaspian and Almaty-Istanbul Corridors. 2022. URL: <https://unece.org/sites/default/files/2022-08/ECE-TRANS-WP5-2022-01e.pdf> (дата звернення: 17.01.25).
5. Медеубаєва Ж., Таштемханова Р., Тугаєв А. Транскаспійський міжнародний транспортний маршрут: нові можливості для діалогу та співпраці. *Геополітика України: історія і сучасність*. Ужгород, 2023. № 1(30). С. 78–86. URL: [https://doi.org/10.24144/2078-1431.2023.1\(30\).78-86](https://doi.org/10.24144/2078-1431.2023.1(30).78-86) (дата звернення: 17.01.2025).
6. The TITR Working Group meeting held in Tbilisi. *Офіційний веб-сайт Middle Corridor – TITR*. 2024. URL: <https://middlecorridor.com/en/press-center/news/the-titr-working-group-meeting-held-in-tbilisi> (дата звернення: 17.01.2025).
7. Міжнародний банк реконструкції та розвитку/Група Світового банку. Middle trade and transport corridor. 2023. URL: <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/6248f697aed4be0f770d319dcaa4ca52-0080062023/original/Middle-Trade-and-Transport-Corridor-World-Bank-FINAL.pdf> (дата звернення: 17.01.2025).
8. Державна служба статистики України. Географічна структура зовнішньої торгівлі України товарами в січні-жовтні 2024 року. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2024/zd/ztt/ztt1024_ue.xls (дата звернення: 17.01.2025).
9. Національний інститут стратегічних досліджень. Міжнародні транспортні проекти як стратегічний чинник розвитку залізничного транспорту. 2024. URL: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/ekonomika/mizhnarodni-transportni-proekty-yak-stratehichnyy-chynnyk-rozvytku> (дата звернення: 17.01.2025).
10. Пороми судноплавної компанії «Укрферрі». URL: <https://www.ukrferry.com/uk/ships> (дата звернення: 17.01.2025).
11. "Укрзалізниця" позбудеться своїх поромів. *Центр транспортних стратегій*. 2024. URL: https://cfts.org.ua/news/2024/07/04/ukrzalznitsya_pozbudetsya_svokh_poromiv_79691 (дата звернення: 17.01.2025).

12. Мельник М.І., Лещух І.В. Розвиток інфраструктури мультимодальних перевезень в Україні у контексті зміни транспортно-логістичних маршрутів в умовах війни: наукова доповідь / ДУ «Інститут регіональних досліджень імені М.І. Долишнього НАН України». Львів, 2023. 51 с. (Серія «Проблеми регіонального розвитку»).

REFERENCES

1. United Nations Conference on Trade and Development. (2024). Review of maritime transport 2024: Navigating maritime chokepoints. Retrieved January 17th, 2025, from: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2024_en.pdf.
2. Shiryayeva L.V., Shagina M. V. (2017). Analysis of the possibilities of using rail ferries SC «Ukrferry» for the transport of containers [Analiz mozhlyvosti vykorystannia zaliznychnykh poromiv SK «Ukrferi» dlia perevezennia konteineriv]. *Development of management and entrepreneurship methods on Transport, 1 (58)*, 75-89.
3. Middle Corridor – TITR official website. Retrieved January 17th, 2025, from: <https://middlecorridor.com/en/about-the-association/history-en>.
4. United Nations Economic and Social Council. (2022). Progress update on the operational capacity of the TransCaspian and Almaty-Istanbul Corridors. Retrieved January 17th, 2025, from: <https://unece.org/sites/default/files/2022-08/ECE-TRANS-WP5-2022-01e.pdf>.
5. Medebaieva Zh., Tashtemkhanova R., Tuhaiev A. (2023). Trans-Caspian international transport route: new opportunities for dialogue and cooperation [Transkaspiskiyi mizhnarodnyi transportnyi marshrut: novi mozhlyvosti dlia dialohu ta spivpratsi]. *Geopolitics of Ukraine: history and modern times, 1(30)*, 78–86.
6. The TITR Working Group meeting held in Tbilisi. (2024). Retrieved January 17th, 2025 from Middle Corridor – TITR official website: <https://middlecorridor.com/en/press-center/news/the-titr-working-group-meeting-held-in-tbilisi>.
7. International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. (2023). Middle trade and transport corridor. Retrieved January 17th, 2025 from: <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/6248f697aed4be0f770d319dcaa4ca52-0080062023/original/Middle-Trade-and-Transport-Corridor-World-Bank-FINAL.pdf/>.
8. State Statistics Service of Ukraine. Geographical structure of Ukraine's foreign trade in goods in January-October 2024. Retrieved January 17th, 2025 from: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2024/zd/ztt/ztt1024_ue.xls.
9. National Institute for Strategic Studies. (2024). International transport projects as a strategic factor in the development of railway transport [Mizhnarodni transportni proekty yak stratehichniy chynnyk rozvytku zaliznychnoho transportu]. Retrieved January 17th, 2025 from: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/ekonomika/mizhnarodni-transportni-proekty-yak-stratehichnyy-chynnyk-rozvytku>.

10. Ferries of the shipping company "Ukrferry". Retrieved January 17th, 2025 from "Ukrferry" official website: <https://www.ukrferry.com/uk/ships>.
11. "Ukrzaliznytsia" will get rid of its ferries ["Ukrzaliznytsia" pozbudetsia svoikh poromiv]. (2024). Retrieved January 17th, 2025 from Center for Transport Strategies website: https://cfts.org.ua/news/2024/07/04/ukrzalznitsya_pozbudetsya_svokh_poromiv_79691.
12. Melnyk M.I., Leshchukh I.V. (2023). Development of multimodal transportation infrastructure in Ukraine in the context of changing transport and logistics routes in wartime conditions: a scientific report [Rozvytok infrastruktury multymodalnykh perevezen v Ukraini u konteksti zminy transportno-lohistrychnykh marshrutiv v umovakh viiny: naukova dopovid]. *"Problems of Regional Development" series.*

**IMPROVEMENT OF THE CHARACTERISTICS OF PROTECTIVE
COATINGS INTENDED FOR THE PROTECTION OF SURFACES
OF AIDS NAVIGATION WATER TRANSPORT**

O.O. Sapronov¹, V.L. Demchenko², V.D. Sharanov³, A.V. Sapronova⁴

¹D.Sc., Professor

*Department of transport technologies and ship repair,
Kherson State Maritime Academy,
Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 000-0003-1115-6556*

²D.Sc., Associate professor, Leading Researcher

*Plastics Welding Department, E.O. Paton Electric Welding Institute
of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-9146-8984*

³Postgraduate

*Department of Transport Technologies and Ship Repair,
Kherson State Maritime Academy,
Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0005-4349-2185*

⁴PhD, Senior Researcher, Department of Transport Technologies and Ship Repair,
*Kherson State Maritime Academy,
Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-4327-4293*

Summary

Introduction. Ensuring global communication is crucial for cargo delivery by water transport within clearly established deadlines. Thus, the reliability of ship radar systems is essential. At the same time, for the reliable operation of radar systems, it is necessary to monitor the condition of their external surfaces, particularly paint coatings. **Purpose.** Develop mathematical models for predicting the characteristics of polymer coatings intended for protecting the surfaces of ship navigation aids. **Results.** To create polymer coatings designed for protecting the surfaces of metal structures, particularly the surfaces of navigation equipment, the epoxy oligomer ED-20, cured with polyethylene polyamine (PEPA), was chosen as a binder. To improve the properties of protective coatings, the following were used: a nanodispersed fullerene-carbon black mixture, with a dispersion of 30...40 nm, and trimethoprim, with a dispersion of 5...10 μm. The optimal content of each filler in the polymer volume was determined based on comprehensive studies of the properties and structure of polymer coatings. To ensure the maximum effect in the form of a ratio of the structure and properties of polymer coatings, mathematical models were developed in the work using the Statgraphics Centurion 19 software, which allowed optimizing the composition of differently dispersed fillers in the matrix to ensure the desired functional properties of materials. **Conclusions.** The rational combination of micro- and nanoscale fillers allowed the structure of the

polymer to be changed. This ensured the maximum value of the adhesive strength at separation, which is 42.0 MPa, and impact strength – 17.2 kJ/m² when introducing trimethoprim into the polymer volume at a content of – 10 pts.wt., and a nanodispersed fullerene-carbon black mixture – 0.050 pts.wt. The developed mathematical models and graphic response surfaces allow us to predict the final properties of polymer coatings. The developed coatings can be used to improve the operational characteristics of ship navigation aids.

Key words: navigation aids, polymer, adhesive strength, impact strength, optical microscopy, mathematical model.

ПІДВИЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ, ПРИЗНАЧЕНИХ ДЛЯ ЗАХИСТУ ПОВЕРХОНЬ ЗАСОБІВ НАВІГАЦІЇ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

О.О. Сапронов¹, В.Л. Демченко², В.Д. Шаранов³, А.В. Сапронова⁴

¹д.т.н., професор, професор кафедри транспортних технологій і судноремонту,
Херсонська державна морська академія,
Херсон, Україна,
ORCID ID: 000-0003-1115-6556

²д.хім.н, доцент, провідний науковий співробітник відділу зварювання пластмас,
Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України,
Київ, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-9146-8984

³аспірант кафедри транспортних технологій і судноремонту,
Херсонська державна морська академія,
Херсон, Україна,
ORCID ID: 0009-0005-4349-2185

⁴доктор філософії, старший науковий співробітник кафедри
транспортних технологій і судноремонту,
Херсонська державна морська академія,
Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-4327-4293

Анотація

Вступ. Забезпечення глобального зв'язку має вирішальне значення для постачання вантажів водним транспортом у чітко встановлені терміни. Таким чином, вагомим є надійність суднових радіолокаційних систем. При цьому для надійної експлуатації радіолокаційних систем необхідно контролювати стан їх зовнішніх поверхонь, зокрема стан лакофарбових покриттів. Отже, **метою** роботи є розроблення математичних моделей для прогнозування характеристик полімерних покриттів призначених для захисту поверхонь суднових засобів навігації. **Результати.** Для створення полімерних покриттів призначених для захисту поверхонь металоконструкцій, зокрема поверхонь навігаційного обладнання, у якості зв'язувача обрано епоксидний олігомер ЕД-20, який затверджували поліетиленполіаміном (ПЕПА). Для поліпшення властивостей захисних покриттів використано: нанодисперсну фулерено-сажову суміш, дисперсністю 30...40 нм і триметоприм, дисперсністю 5...10 мкм. На основі комплексних досліджень властивостей і структури полімерних покриттів визначено оптимальний вміст

кожного наповнювача у об'ємі полімеру. Для забезпечення максимального ефекту у вигляді співвідношення структури і властивостей полімерних покриттів у роботі розроблено математичні моделі, з використанням програмного забезпечення Statgraphics Centurion 19, які дозволили оптимізувати склад різнодисперсних наповнювачів у матриці для забезпечення бажаних функціональних властивостей матеріалів. **Висновки.** Раціональне поєднання наповнювачів мікро- і наномасштабного рівня дозволило змінити структуру полімеру. Це дозволило забезпечити максимальне значення адгезійної міцності при відриві, яка становить 42,0 МПа і ударної в'язкості – 17,2 кДж/м² при введенні у об'єм полімеру триметоприму за вмісту – 10 мас.ч., і нанодисперсної фулерено-сажової суміші – 0,050 мас.ч. Створені математичні моделі і графічні поверхні відгуків дозволяють прогнозувати вихідні властивості полімерних покриттів. Розроблені покриття можливо використовувати для підвищення експлуатаційних характеристик суднових засобів навігації.

Ключові слова: засоби навігації, полімер, адгезійна міцність, ударна в'язкість, оптична мікроскопія, математична модель.

Introduction. To protect the surfaces of navigation aids (antennas, echo sounders, radars, compasses) for water transport, polymer coatings are used, particularly epoxy-based ones, since they contain hydroxyl, ether, and epoxy groups. These groups are polar and not only interact with the metal substrate but also contribute to the diffusion process due to their interaction with metal oxides. Despite the protective functions of polymer coatings, the condition of the paint coating on ship navigation equipment is inspected annually in accordance with the requirements of the International Maritime Organization (IMO), the International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS, chapters IV, V), and the regulations of classification societies (DNV, Lloyd's Register) [1–5]. Therefore, there is a need to search for new ingredients for the development of protective coatings for the navigation complex that will comply with the requirements of international organizations, classification societies, associations, and conventions.

Statement of the problem. When developing protective coatings, there is a possibility that a single filler will not be able to simultaneously improve multiple properties. This can be achieved by introducing several fillers into the epoxy matrix [6–9]. The combination of micro- and nanoscale fillers ensures a uniform distribution of mechanical stresses within the polymer volume, preventing the formation and propagation of micro- and macro-cracks, and enhancing rigidity and resistance to deformations through the formation of a multi-level coating structure.

Analysis of recent research and publications. One of the effective methods for creating coatings with the required set of properties is modification of materials by introducing polydisperse fillers into the matrix [10–12]. In this case, nanocarbon and dispersive fillers are introduced into the matrix to reinforce epoxy composites and coatings based on them [13–15], ensuring a wide range of industrial applications. To maximize the effect on the structure and properties of polymer coatings, it is essential to develop mathematical models that will optimize the composition of ingredients within the matrix to achieve the desired functional properties of materials.

Purpose: develop mathematical models for predicting the characteristics of polymer coatings intended for protecting the surfaces of ship navigation aids.

Presentation of the main material. Materials and methods. To create polymer coatings intended for the protection of metal structures surfaces, in particular surfaces of navigation equipment, the following ingredients were selected: binder – epoxy oligomer ED-20; hardener – polyethylene polyamine (PEPA), with a component ratio (wt. parts) – ED-20: PEPA – 100: 10.

To improve the properties, the following were used:

– nanodispersed fullerene-carbon black mixture (NFCM) (YongFeng Chemicals, Hefei, China). NFCM is a nanocarbon material obtained by synthesizing fullerenes using laser evaporation of graphite technology. The size of NFCM is 30...40 nm;

– filler trimethoprim $C_{14}H_{18}N_4O_3$ (TMP) (CAS: 738-70-5), a synthetic antibiotic capable of inhibiting microorganisms and bacteria. The size of the TMP is 5...10 μm ;

The formation of coatings was performed in a specific sequence, as outlined in the works [6, 7, 15].

The adhesion strength of the matrix to the metal base was investigated according to ASTM D897-08.

The impact strength (W) was determined by the Charpy method according to ASTM D6110–18.

The study of the structure of the composites was carried out on a microscope model XJL-17AT and Versamet 2. For digital image processing, the software “Levenhuk ToupView” was used.

The deviation of the values in the studies of the adhesion strength and physical and mechanical properties of the developed polymers was 2...5% of the nominal.

Statistical methods: the statistical processing of the obtained results was performed using the software package for statistical data processing: Statgraphics Centurion 19, with the definition of Cochran's, Student's, Fisher's criteria.

Analysis of properties and structure of polymer materials. Based on the study's previous results, the maximum values of adhesive and cohesive strength were established for polymer materials filled with a nanodispersed filler (fullerene-carbon black mixture) and a dispersed filler (trimethoprim $C_{14}H_{18}N_4O_3$). The maximum values of adhesive ($\sigma_a = 36.5$ MPa) and cohesive ($W = 15.2$ kJ/m²) strength were observed when a nanodispersed fullerene-carbon black mixture was introduced with content of $q = 0.050...0.075$ pts.wt. In this case, changing the content of the nanodispersed filler from $q = 0.050$ pts.wt. to $q = 0.100$ pts.wt. provide a change in the structure and, therefore, the properties of the protective coatings (Fig. 1, a-b). The surface of the polymer material, which was not subjected to mechanical treatment, was investigated using optical microscopy. Based on the analysis of fracture fractograms, it can be stated that the structure of polymer materials with the content of NFCM $q = 0.050$ pts.wt. and $q = 0.075$ pts.wt. (Fig. 1, a, b) is characterized by the presence of straight and, in some cases, parallel cleavage lines. This indicates a uniform distribution of internal stresses in the polymer system. In comparison, increasing the content of nanofiller to $q = 0.100$ pts.wt. creates conditions for forming brittle areas in the polymer volume (Fig. 1, c). The value of the mechanical strength of such materials decreases to $W = 13.6$ kJ/m².

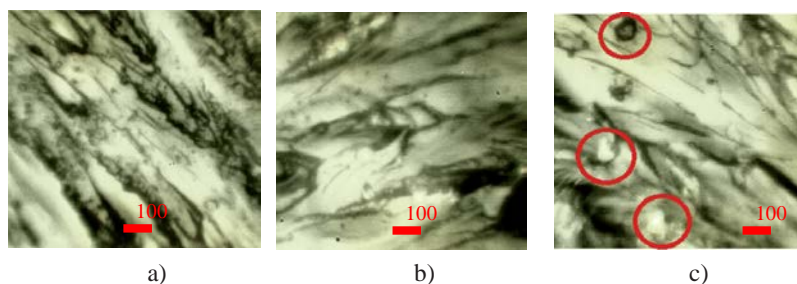


Fig. 1. Fracture structure of polymeric materials with different contents of nanodispersed fullerene-carbon black mixture: a) $q = 0.050$ pts.wt; b) $q = 0.050$ pts.wt; c) $q = 0.100$ pts.wt.

The dispersed filler TMP showed the maximum values of the adhesive ($\sigma_a = 37.0$ MPa) and cohesive ($W = 12.8$ kJ/m²) strength were observed when trimethoprim was introduced at a content of $q = 10$ pts.wt. As in the previous case, a change in the structure of polymeric materials was observed when a dispersed filler was introduced. Analysis of the fracture structure of the polymer (Fig. 2, a) allowed us to identify a relief surface structure with the presence of trimethoprim particles.

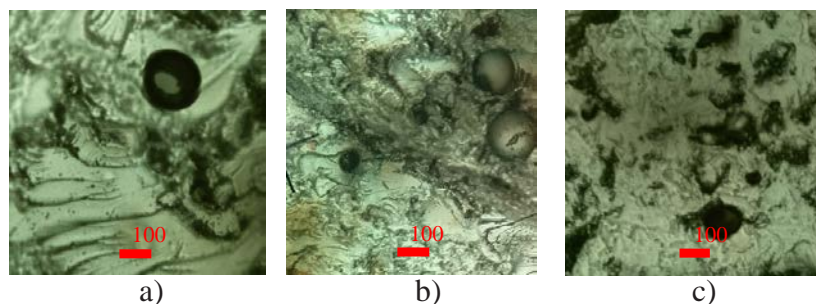


Fig. 2. Fracture structure of polymeric materials with different trimethoprim contents: a) $q = 5.0$ pts.wt.; b) $q = 10.0$ pts.wt.; c) $q = 15.0$ pts.wt.

The nature of the filler distribution in the polymer binder is not uniform. We analyzed the fracture structures of a polymeric material filled with trimethoprim at a content of $q = 10$ pts.wt. (Fig. 2, b). This allowed us to identify more particles in the polymer volume, the lateral surface of which borders on the cleavage lines. This indirectly indicates the formation of physicochemical bonds around the particles of the dispersed filler, which changes the trajectory of crack propagation under the influence of impact loading. When the filler content increases to $q = 15$ pts.wt. (Fig. 2, c), an uneven distribution of particles in the polymer volume was observed. The brittle nature of the fracture changes to a more viscous one.

So, based on the analysis of the structure and properties of polymeric materials filled with dispersed and nanodispersed fillers, the following can be stated:

– to ensure adhesion strength, it is possible to use both dispersed and nanodispersed fillers since the values of the adhesion strength are sufficient for application in the protection of water transport surfaces;

– to improve the physical and mechanical properties of protective coatings, it is advisable to use a nanodispersed filler since the mechanical properties differ from those of a polymeric material filled with a dispersed filler. However, taking into account the properties of trimethoprim (a synthetic antibiotic capable of inhibiting microorganisms and bacteria), it is advisable to use it when filling coatings for anti-corrosion and anti-fouling protection of surfaces of ship navigation aids. Therefore, one of the methods of increasing mechanical characteristics, and as a consequence of protection from aggressive external factors, is to combine fillers of different physico-chemical nature and dispersion.

Mathematical modeling of properties of protective coatings. Considering the above, the problem of improving the characteristics of protective coatings designed for the protection of water transport surfaces was addressed by optimizing the composition of polydisperse fillers in the epoxy binder when setting up an active experiment, i.e., using an orthogonal plan of the 2nd degree 3^2 . The content of the ingredients was selected based on previous comprehensive studies of the adhesive and physico-mechanical properties of epoxy composite materials. The primary levels of change in the content of TMP and NFCM components are given in Table. 1.

Table 1

Variable levels in conventional and natural scales

Name of ingredients	Factor	Intermediate level, q, pts. wt.	Variation step, Δq , pts.wt.	Value of content of variable parameters/ingredients, pts.wt.		
				-1	0	+1
Trimethoprim $C_{14}H_{18}N_4O_3$ (TMP)	x_1	10.0	5.0	5.0	10.0	15.0
Nanodispersed fullerene-carbon black mixture (NFCM)	x_2	0.050	0.025	0.025	0.050	0.075

According to the complete factorial experiment (CFE) design, a series of 9 experiments ($N = 9$) was conducted, each of which was repeated five times ($p = 5$). The experiment was carried out randomly according to the experimental scheme in [6, 7] to exclude systematic errors. The CFE design matrix and its results are given in Table 2.

Table 2

Results of research on the properties of polymer materials

№ Experiment	Component content, q, pts.wt.		Adhesion strength, σ_a , MPa	Impact strength, W, kJ/m ²
	x_1	x_2	y_1	y_2
1	5.0	0.025	39.8	15.1
2	15.0	0.025	36.1	15.2
3	5.0	0.075	37.2	15.4
4	15.0	0.075	35.0	15.0
5	10.0	0.050	41.3	17.2
6	15.0	0.050	38.0	17.0
7	5.0	0.050	42.0	17.1
8	10.0	0.075	36.3	15.8
9	10.0	0.025	37.5	16.3

The mathematical model of the dependencies $y = f(x_1, x_2)$ was expressed in the form of a regression equation:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{12} x_1 x_2 \quad (1)$$

The formula determined the regression coefficients for adhesive strength and impact strength according to [6, 7], the values of which are given in Table 3.

Table 3

Regression equation coefficients

Marking	Regression equation coefficient for adhesion strength	Regression equation coefficient for impact strength
b_0	40.67	17.52
b_1	-1.65	-0.07
b_2	-0.82	-0.07
b_{11}	-0.35	-0.63
b_{22}	-3.45	-1.63
b_{12}	0.37	-0.13

Based on the calculations performed, the following regression equations were obtained for the two properties under study: adhesive strength at separation (y_1) and impact strength (y_2):

$$y_1 = 40.67 - 1.65 x_1 - 0.82 x_2 - 0.35 x_1^2 - 3.45 x_2^2 + 0.37 x_1 x_2$$

$$y_2 = 17.52 - 0.07 x_1 - 0.07 x_2 - 0.63 x_1^2 - 1.63 x_2^2 - 0.13 x_1 x_2$$

For statistical processing of the obtained experimental results, a test of the reproducibility of the experiments was carried out according to the Cochran's test:

$$G = \frac{S_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^N S_u^2} \leq G_{(0.05; f_1; f_2)} \quad (2)$$

The formula determined adequacy variances:

$$S_{ui}^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}{m-1} \quad (3)$$

where y_m – the value obtained from each parallel experiment; \bar{y} – the average value of the quantity obtained in parallel experiments.

The formulas determined the reproduction variances:

$$\sigma^2 \{y\} = \frac{\sum_{i=1}^{N=9} \sigma^2 \{y_i\}}{N(m-1)}; \quad (4)$$

where $\sigma^2 \{y\}_i = \sum_{i=1}^{m=5} (y_i - \bar{y})^2$;

$$\sigma^2 \{y_a\} = \frac{\hat{a}^2 \{\hat{\sigma}\}}{N}, \quad S_{b_0}^2 = \frac{S_0^2}{N} \quad (5)$$

The values of the obtained calculations of the variances of adequacy and reproduction are given in Table 4.

Table 4

Calculation results

№	Adequacy variances			Reproduction variances		
	Symbol	Value for y_1	Value for y_2	Symbol	Value for y_1	Value for y_2
1	S_{u1}^2	0.043	0.030	$\sigma^2\{y\}_1$	0.087	0.060
2	S_{u2}^2	0.053	0.063	$\sigma^2\{y\}_2$	0.107	0.127
3	S_{u3}^2	0.003	0.010	$\sigma^2\{y\}$	0.007	0.020
4	S_{u4}^2	0.043	0.013	$\sigma^2\{y\}_4$	0.087	0.027
5	S_{u5}^2	0.010	0.003	$\sigma^2\{y\}_5$	0.020	0.007
6	S_{u6}^2	0.013	0.010	$\sigma^2\{y\}_6$	0.027	0.020
7	S_{u7}^2	0.023	0.070	$\sigma^2\{y\}_7$	0.047	0.140
8	S_{u8}^2	0.043	0.010	$\sigma^2\{y\}$	0.087	0.020
9	S_{u9}^2	0.023	0.040	$\sigma^2\{y\}_9$	0.047	0.080

At the same time:

$$\sum_{i=1}^N S_{ui}^2 = 0.257 (y_1); \sum_{i=1}^N S_{ui}^2 = 0.250 (y_2);$$

$$\sigma^2\{y\} = S_0^2 = 0.029 (y_1); \sigma^2\{y\} = S_0^2 = 0.028 (y_2);$$

Then, the estimated value of the Cochran's criterion at a confidence level of $P_d = 0.95$ was determined by the formula:

$$G_c = \frac{S_{u_{\max}}^2}{\sum_{i=1}^N S_{ui}^2}; \quad (6)$$

$$G_c = \frac{0.053}{0.257} = 0.208 (y_1); G_c = \frac{0.070}{0.250} = 0.28 (y_2)$$

Verification of the experimental results according to Cochran's criterion [6, 7] for a confidence level $P_d = 0.95$ confirmed the reproducibility of the experiments for the investigated initial parameters (y_1) and (y_2). In this case, the dispersions characterizing the dispersion of the experimental results on the combination of factor levels are $S_{u_{\max}}^2 = 0,053 (y_1); 0,070 (y_2)$. Calculated values of Cochran's criterion: $G_c = 0.208 (y_1)$, $G_c = 0.28 (y_2)$. Then, as the tabular value of the Cochran criterion: $G_{tab} = 0.478$.

That is, condition (2) is fulfilled:

$$G_c = 0,208 \leq G_{tab} = 0,478$$

$$G_c = 0,28 \leq G_{tab} = 0,478$$

The significance of the regression equation coefficients was further determined by analyzing the results according to the experimental plan (Table 5).

Table 5

Results of the study of adhesive strength and impact toughness

№	Adhesion strength, σ MPa					Average property value
	1	2	3	4	5	6
1	39.7	39.7	39.8	39.7	40.1	39.8
2	36.5	36.1	35.7	36.1	36.1	36.1
3	37.0	37.5	37.1	37.2	37.2	37.2
4	34.9	35.3	35.0	35.1	34.7	35.0
5	41.2	41.4	41.2	41.3	41.4	41.3
6	38.0	37.9	38.1	38,1	37.9	38.0
7	42.0	42.1	42.1	42.0	41.8	42,0
8	36.1	36.3	36.3	36.2	36.6	36.3
9	37.5	37.6	37.3	37.5	37.6	37.5
Impact strength, W kJ/m²						
1	15.1	15.1	15.2	15.2	14.9	15.1
2	15.2	15.1	15.0	15.2	15.5	15.2
3	15.2	15.3	15.4	15.5	15.6	15.4
4	14.9	14.9	15.0	15.0	15.2	15.0
5	17.2	17.1	17.2	17.3	17.2	17.2
6	17.0	17.0	17.1	17.0	16.9	17.0
7	17.1	17.1	17.0	16.9	17.4	17.1
8	15.8	15.8	15.8	15.9	15.7	15.8
9	16.3	16.3	16.3	16.5	16.1	16.3

Further, the variances of the regression coefficients (Table 6) were determined using the formula:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_0^2}{\sum_{u=1}^N x_u^2} \quad (7)$$

The Student test [6, 7] determined the significance of the regression coefficients' significance. In this case, the tabular (t_t) and calculated (t_c) Student tests were determined (Table 6). For a confidence level of $P_d = 0.95$, the tabular value of the Student test is $t_t = 2.028$.

When constructing a mathematical model for predicting adhesion characteristics, the calculated values of the Student's test $t_{0p}, t_{1p}, t_{2p}, t_{11p}, t_{22p}, t_{12p}$ (Table 6) are more significant than t_t .

Therefore, it was considered that all coefficients of the regression equation are substantial, and thus, the equation remains unchanged:

$$y_1 = 40.67 - 1.65 x_1 - 0.82 x_2 - 0.35 x_1^2 - 3.45 x_2^2 + 0.37 x_1 x_2$$

Then, when constructing a mathematical model for predicting impact toughness, the calculated values of the Student's test t_{1p}, t_{2p}, t_{12p} (Table 6) are less than t_t . Therefore, the equation takes the form:

$$y_2 = 17.52 - 0.63 x_1^2 - 1.63 x_2^2$$

Table 6

Dispersions of the regression coefficients (S_b^2) and calculated values of the Student test (t_p)

№	Dispersions of regression coefficients			Calculated Values of Student's test		
	Symbol	Value for y_1	Value for y_2	Symbol	Value for y_1	Value for y_2
1	$S_{b_0}^2$	0.003	0.003	t_{0p}	701.22	302.58
2	$S_{b_1}^2$	0.005	0.005	t_{1p}	23.93	0.98
3	$S_{b_2}^2$	0.005	0.005	t_{2p}	11.85	0.98
4	$S_{b_{11}}^2$	0.014	0.014	t_{11p}	2.93	5.37
5	$S_{b_{22}}^2$	0.014	0.014	t_{22p}	28.89	13.86
6	$S_{b_{12}}^2$	0.007	0.007	t_{12p}	4.4	1.5

The adequacy of the obtained model was checked using Fisher's test [6, 7] :

$$F_c = \frac{S_{u\max}^2}{S_y^2} \leq F(0.95; f_{\hat{\alpha}\sigma}; f_y) \quad (8)$$

Therefore, the following values of the Fisher's calculation criterion were obtained:

$$F_c = 1.827 (y_1), F_c = 2.5 (y_2).$$

Based on the calculations, it was found that the calculated value of the Fisher's test is less than the tabular value, i.e., condition (8) is fulfilled. This makes it possible to state that the obtained mathematical models for predicting adhesion and physical and mechanical properties adequately describe the composition.

To convert the conditional values of the variable parameters into natural values, the following equation was used [6, 7]:

$$x_i = \frac{q_i - q_{i0}}{\Delta q_i} \quad (9)$$

where q_i – the value of the i th factor of the experiment,

q_{i0} – the value of the zero level,

Δq_i – the variation interval.

By substituting these values according to formula (9) into the regression equation and transforming it, we obtained the following mathematical models with the natural value of the variable parameters:

$$\sigma_a = 31.9 - 0.2q_1 + 489.333q_2 - 0.014q_1^2 + 3.0q_1q_2 - 5520.0q_2^2$$

$$W = 8.22222 + 0.543333q_1 + 268.667q_2 - 0.0253333q_1^2 - 1.0q_1q_2 - 2613.33q_2^2$$

The obtained mathematical models allow for predicting the values of the output quantities (y_1, y_2) for the presented points in the middle of the factor variation area. The geometric interpretation of the response surface is given in Fig. 3, 4.

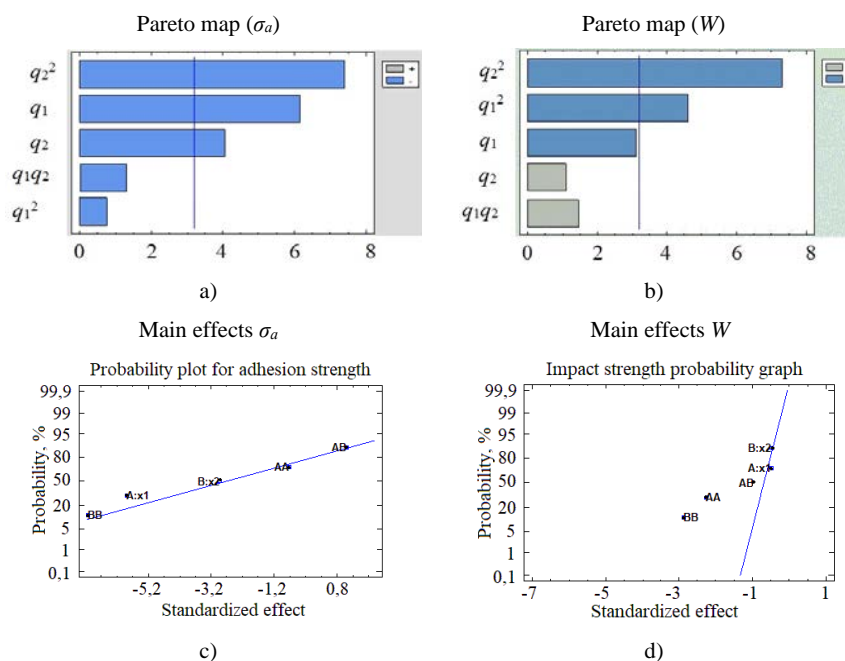


Fig. 3. Pareto maps (a, b) and main effects (c, d):
AA – q_1 ; BB – q_2 ; Ax1 – q_1^2 ; Ax2 – q_2^2 ; AB – q_1q_2

Based on the presented Pareto maps (Fig. 3, a, b), which were obtained when analyzing the experimental database using the Statgraphics Centurion 19 software, it can be stated that the most statically significant effects that affect the initial parameters under study (y_1 and y_2) are those that cross the vertical line (corresponding to a confidence level of 0.95). Therefore, it can be stated that the most significant factors for improving the adhesion characteristics are q_2^2 , q_1 , and q_2 , i.e., the square value of the content of the fullerene-carbon black mixture, the value of the content of trimethoprim and the nano dispersed fullerene-carbon black mixture. The most significant factors for increasing the impact strength are q_2^2 and q_1^2 , i.e., the square values of the content of the two additives. Based on the Pareto maps, it can also be stated that the influence of the main filler's content is stronger than the additional one.

Additional analysis of the graphs for diagnosing errors in the obtained values allows us to state that the maximum deviation of factors from a direct distribution indicates their significance in forming a mathematical model. Thus, it can be noted that all aspects in the mathematical model (y_1) are significant (consistent with previous calculations) since they are as close as possible to a direct distribution. Then, when analyzing the probability graph for the mathematical model (y_2), we observed some deviation of factors from a direct distribution, which allows us to state their indirect influence in predicting impact toughness. In this case, the most significant are their quadratic values of the ingredient content.

Based on mathematical modeling and Statgraphics Centurion 19 software, response surfaces and their contours for the studied output parameters y_1 and y_2 (Fig. 4).

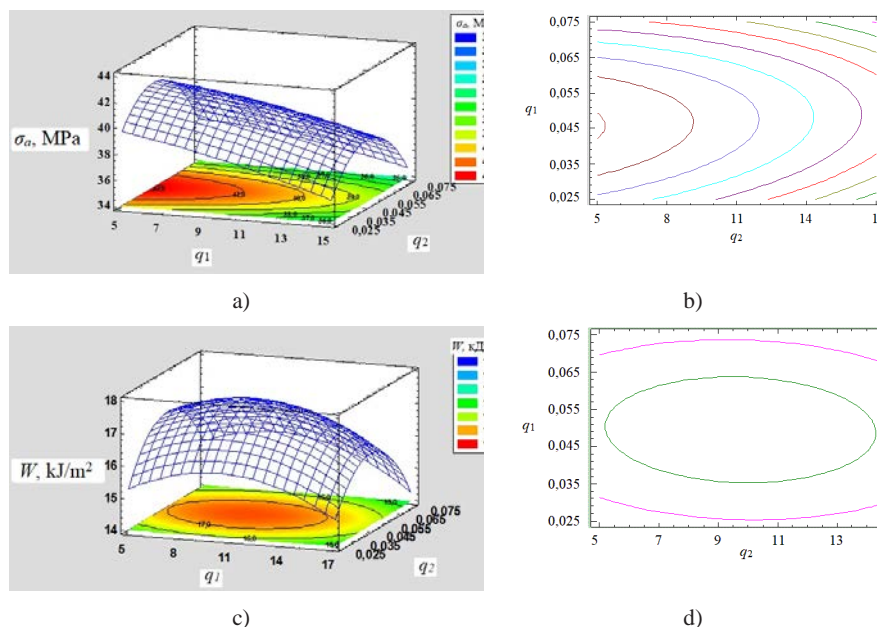


Fig. 4. Calculated response surface and response surface contours $\sigma_a / W = f(q_1, q_2)$

Thus, after optimizing the content of fillers of different physicochemical natures and dispersion, an increase in the protective coatings' adhesion and mechanical strength by 1.1 to 1.3 times was observed (compared to composites with only a single filler). Additional analysis of the structure of the polymer material, which contains trimethoprim – 10.0 pts.wt. and a nanodispersed fullerene-carbon black mixture – 0.050 pts.wt. (Fig. 5), allows us to state that the increase in impact strength is associated with the maximum densification of the polymer structure.

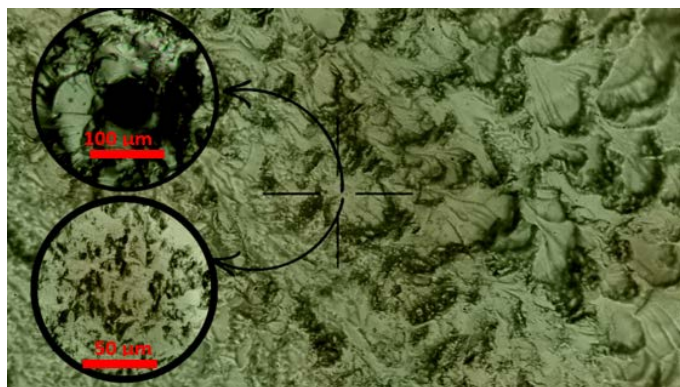


Fig. 5. Fracture structure of polymeric materials with an optimal content of trimethoprim (10.0 pts.wt.) and nanodispersed fullerene-carbon black mixture (0.050 pts.wt.)

At the same time, the synergy between particles of different dispersion and physico-chemical nature ensures the filling of voids with nanofiller, thus increasing the density of the material, and, as a result, creates conditions for a uniform distribution of mechanical loads in the material. This, in turn, allows us to reduce the likelihood of the spread of microcracks, which create the prerequisites for forming large prominent cracks, destroying the polymer.

Conclusion. Setting up an active experiment using an orthogonal plan of the 2nd degree 3^2 allowed us to obtain results, with the help of which mathematical models were created that describe the dependence of the adhesive strength and impact strength of polymeric materials on the content of fillers of different dispersion and physicochemical nature.

Based on the mathematical model and its graphic representation in the form of response surfaces projected onto a plane in the form of a set of lines (which correspond to the optimization parameters), it was established that the adhesive strength increases with an increase in the trimethoprim content to 7.0 pts.wt. Increasing the content of more than 7.0 pts.wt. of trimethoprim provides a linear decrease in the studied property. Regarding the nanodispersed fullerene-carbon black mixture, the concentration curves pass through a maximum at an additive content of 0.040...0.050 pts.wt. While the impact strength increases with increasing trimethoprim content in the range of 8.0 wt. parts to 15.0 pts.wt., and 0.035...0.065 pts.wt. of nanodispersed fullerene-carbon black mixture, respectively. However, the maximum values of the initial parameters ($\sigma_a = 42.0$ MPa, $W = 17.2$ kJ/m²) were observed when the ingredients were introduced at the following content: trimethoprim ($d = 5...10$ μm) – 5...10 pts.wt., nanodispersed fullerene-carbon black mixture ($d = 30...40$ nm) – 0.050 pts.wt. per 100 pts.wt. of epoxy oligomer ED-20 and 10 pts.wt. of hardener PEPA.

It is proven that the increase in adhesive and physico-mechanical properties (compared to the unfilled matrix – $\sigma_a = 24.4$ MPa, $W = 7.0$ kJ/m²) by 1.7...2.4 times is associated with a change in the polymer structure, which is due to the physicochemical interaction of the ingredients and mechanical compaction. This makes it possible to use the developed materials to form functional coatings for protection against external factors of ship navigation aids.

REFERENCES

1. Ozaki, M., ISO 9223. Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres. Classification. ISO. Geneva. 1992. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/16855/c18be4081cfc44aba101e3448e3539b6/ISO-9223-1992.pdf>
2. International maritime organization IMO. RESOLUTION A.744(18) [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.744\(18\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.744(18).pdf)
3. SOLAS (Safety of Life at Sea) Consolidated Edition, 2020. <https://www.samgongustofa.is/media/english/SOLAS-2020-Consolidated-Edition.pdf>
4. RESOLUTION MSC.215(82). [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MS.215\(82\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MS.215(82).pdf)
5. Rules and Regulations for the Classification of Ships. <https://www.imorules.com/LRSHIP.html>

6. Buketov, A., Saprnov, O., Klevtsov, K., Kim, B. (2023) Functional Polymer Nanocomposites with Increased Anticorrosion Properties and Wear Resistance for Water Transport. *Polymers*, 15: 3449. <https://doi.org/10.3390/polym15163449>
7. Panda, A., Dyadyura, K., Valíček, J., Harničárová, M., Kušnerová, M., Ivakhniuk, T., Hrebnyk, L., Saprnov, O., Sotsenko, V., Vorobiov, P., Levytskyi, V., Buketov, A., Pandová, I. (2022) Ecotoxicity Study of New Composite Materials Based on Epoxy Matrix DER-331 Filled with Biocides Used for Industrial Applications. *Polymers*, 14(16): 3275. <https://doi.org/10.3390/polym14163275>
8. Masiuchok, O., Iurzhenko, M., Kolisnyk, R., Mamunya, Ye., Godzierz, M., Demchenko, V., Yermolenko, D., Shadrin, A. (2022) Polylactide/Carbon Black Segregated Composites for 3D Printing of Conductive Products. *Polymers*, 14: 4022. <https://doi.org/10.3390/polym14194022>
9. Demchenko, V.L., Kobylinskyi, S.M., Riabov, S.V., Shtompel, V.I., Iurzhenko, M.V., Rybalchenko, N.P. (2020) Novel approach to formation of silver-containing nanocomposites by thermochemical reduction of Ag^+ ions in interpolyelectrolyte-metal complexes. *Applied Nanoscience*, 10(12): 5409–5419. <https://doi.org/10.1007/s13204-020-01368-0>
10. Tomina, A.-M., Yeromenko, O. (2023) The dependence of the abrasive wear resistance of ultra-high-molecular-weight polyethylene on the content of mineral fillers with needle-like structure. *Functional Materials*, 30 (3): 403–406. <https://doi.org/10.15407/fm30.03.403>
11. Demchenko, V., Riabov, S., Shtompel' V. (2017) X-ray study of structural formation and thermomechanical properties of silver-containing polymer nanocomposites. *Nanoscale Research Letters*, 12: 235–240. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-1967-2>
12. Stukhlyak, P.D., Moroz, K.M. (2011). Influence of porosity in the epoxy matrix-polyvinyl alcohol-disperse filler system on the impact toughness. *Mater. Sci.* 46(4): 455-463. DOI: 10.1007/s11003-011-9312-x
13. Dobrotvor, I.G., Stukhlyak, P.D., Mykytyshyn, A.G., et al. (2021) Influence of Thickness and Dispersed Impurities on Residual Stresses in Epoxy Composite Coatings. *Strength Mater.*, 53: 283–290. DOI: 10.1007/s11223-021-00287-x
14. Grashchenkova, M.A., Tomina, A.-M.V., Burya, O.I., Krasnovyd, S.V. Konchits, A.A., Shanina, B.D. (2023) Influence of Carbon Fibres on Properties of Composites Based on Sulfaryl-BSP-7 Copolymer. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, 21 (1): 139–151. https://www.imp.kiev.ua/nanosys/ua/articles/2023/1/nano_vol21_iss1_p0139p0151_2023_abstract.html
15. Saprnov, O., Buketov, A., Kim, B., Vorobiov, P., Saprnova, L. (2024) Increasing the Service Life of Marine Transport Using Heat-Resistant Polymer Nanocomposites. *Materials*, 17: 1503. <https://doi.org/10.3390/ma17071503>

ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ
ДІАГОНАЛЬНИХ ПІШОХІДНИХ ПЕРЕХОДІВ
НА ПЕРЕХРЕСТЯХ М. ХАРКІВ

О.О. Холодова¹, М.О. Бугайова²

¹канд. техн. наук, доцент кафедри «Організації та безпеки дорожнього руху»,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
Харків, Україна,

ORCID ID: 0000-0002-4217-0548

²ст. викл. кафедри «Організації та безпеки дорожнього руху»,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
Харків, Україна,

ORCID ID: 0000-0002-9101-9959

Анотація

Вступ. Покращення міської мобільності є важливим для якості життя та екології міст. Розвиток громадського транспорту, велосипедних доріжок і пішохідних зон знижує затори та викиди парникових газів. Організація пішохідного руху підвищує безпеку та комфорт пересування. Серед сучасних рішень – діагональні пішохідні переходи (ДПП), які дозволяють перетинати перехрестя у будь-якому напрямку. Вони зменшують затримки руху та ризики ДТП, стаючи популярним вибором у сучасних містах. **Мета.** Ця стаття присвячена обґрунтуванню необхідності та попередній оцінці впровадження ДПП. Відсутність таких рішень створює незручності для пішоходів і підвищує ризик ДТП на перехрестях з інтенсивним рухом. Дослідження базується на аналізі успішного міжнародного досвіду через обмеження місцевої інфраструктури. **Результати.** Дослідження ДПП демонструють їх ефективність у підвищенні безпеки пішоходів і зниженні конфліктів із транспортом. Приклади успішного впровадження є в багатьох містах світу. В Україні такі переходи з'явилися не у всіх містах, хоча міжнародний досвід доводить важливість застосування технологічних рішень для оптимізації дорожнього руху та безпеки пішоходів. У дослідженні проаналізовано можливість впровадження ДПП на прикладі перехрестя вулиць Європейська – Патріарха Мстислава – Остапа Вишині в м. Полтава. Визначено критерії для його введення, запропоновано дві схеми пофазного роз'їзду, проведено моделювання дорожнього руху та оцінено ефективність змін за показниками затримок, безпеки та екологічного впливу. **Висновки.** Результати моделювання та аналізу функціонування досліджуваного перехрестя вказують на ефективність впровадження ДПП. Встановлено середнє зниження затримок руху транспортних засобів (ТЗ) і пішоходів, обсягу витрат палива та довжини заторів приблизно на 10%. Це підтверджує раціональність впровадження ДПП для оптимізації пропускної здатності перехрестя та зменшення транспортних витрат. Враховуючи високий рівень інтенсивності транспортних потоків (ТП) у м. Харків, впровадження ДПП є перспективним рішенням для підвищення безпеки пішоходів та покращення організації руху.

Ключові слова: діагональний пішохідний перехід, перехрестя, дорожній рух, схема пофазного роз'їзду, безпека, моделювання

JUSTIFICATION OF THE NEED TO INTRODUCE DIAGONAL PEDESTRIAN
CROSSINGS AT THE INTERSECTIONS OF KHARKIV

O.O. Kholodova¹, M.O. Buhaiova²

¹Candidate of Engineering Sciences (Ph.D),
Associate Professor at the Department of Traffic Management and Road Safety,
Kharkiv National Automobile and Highway University,
Kharkiv, Ukraine,

ORCID ID: 0000-0002-4217-0548

²Senior Lecturer at the Department of Traffic Management and Road Safety,
Kharkiv National Automobile and Highway University,
Kharkiv, Ukraine,

ORCID ID: 0000-0002-9101-9959

Summary

Introduction. Improving urban mobility is important for the quality of life and the environment of cities. Developing public transport, bicycle paths, and pedestrian areas reduces congestion and greenhouse gas emissions. The organization of pedestrian traffic increases the safety and comfort of movement. Modern solutions include diagonal pedestrian crossings (DPC), which allow people to cross intersections in either direction. They reduce traffic delays and the risk of accidents, making them a popular choice in modern cities. **Purpose.** This article focuses on the rationale and preliminary assessment of the feasibility of implementing DPC. The absence of such solutions inconveniences pedestrians and increases the risk of accidents at intersections with heavy traffic. The study is based on the analysis of successful international experiences due to local infrastructure limitations. **Results.** Studies of DPC demonstrate their effectiveness in improving pedestrian safety and reducing conflicts with vehicles. There are examples of successful implementation in many cities around the world. In Ukraine, such crossings have not appeared in all cities, although international experience proves the importance of applying technological solutions to optimize traffic flows and pedestrian safety. The study analyses the possibility of introducing a DPC, using the example of the intersection of Evropeiska – Patriarch Mstyslav – Ostap Vyshnia streets in Poltava. The criteria for its implementation are defined, it is proposed to consider two schemes of crossing the carriageway by pedestrians, traffic modeling is carried out, and the effectiveness of changes in terms of delays, safety, and environmental impact is assessed. **Conclusions.** The modeling and analysis results of the functioning of the studied intersection indicate the effectiveness of DPC implementation. An average reduction of vehicle and pedestrian delays, fuel consumption, and congestion length by about 10% was found. This confirms the rationality of implementing DPC to optimize intersection capacity and reduce transport costs. Given the high level of traffic in Kharkiv, DPC is a promising solution for improving pedestrian safety and traffic management.

Key words: diagonal pedestrian crossing, intersection, traffic, phase separation scheme, safety, modeling.

Вступ. Покращення міської мобільності є важливим для багатьох аспектів життя сучасного міста. Щоденні затори у великих містах призводять до втрат часу, підвищення рівня стресу та зниження продуктивності. Покращення

транспортної інфраструктури, включаючи громадський транспорт, велосипедні доріжки та пішохідні зони, сприяє зменшенню кількості приватних автомобілів на дорогах і зниженню заторів. До того ж транспорт є одним з основних джерел викидів парникових газів у містах. Переходячи на екологічні види транспорту (електробуси, велосипедний рух, пішохідні прогулянки), міста можуть зменшити викиди, покращити якість повітря та сприяти боротьбі зі зміною клімату. Добре спланована мобільність дозволяє жителям швидко та зручно пересуватися містом, витрачаючи менше часу на дорогу. Це дає більше часу для роботи, відпочинку і спілкування з родиною та друзями. Розвиток доступної транспортної інфраструктури (наприклад, безбар'єрного доступу до громадського транспорту) забезпечує рівний доступ до всіх частин міста для людей з обмеженими можливостями, літніх людей, батьків з дитячими візками тощо. Ефективна мобільність сприяє економічному розвитку, оскільки полегшує доступ до робочих місць, освітніх та культурних установ, стимулює підприємництво і туризм. Водночас зменшення заторів знижує витрати на паливо та обслуговування ТЗ. Заохочення до активного транспорту (пішки чи на велосипеді) сприяє поліпшенню фізичного здоров'я жителів, зменшуючи ризики захворювань, пов'язаних з малорухливим способом життя. Все перелічене робить покращення міської мобільності ключовим завданням для сучасних міст. Тому багато міст, включаючи українські, активно працюють над реформуванням своїх транспортних систем.

Одним з основних напрямків реформування є організація пішохідного руху, яка відіграє важливу роль у забезпеченні безпеки та зручності пересування містом. Пішохідні зони мають бути спроектовані таким чином, щоб мінімізувати ризики ДТП і конфліктів між пішоходами та ТЗ, а також сприяти швидкому й комфортному руху. Відомими методами організації пішохідного руху є [1]: традиційні пішохідні переходи (класичні «зебри» з горизонтальною розміткою, які встановлюються на кожному перехресті для безпечного перетину дороги); надземні та підземні переходи (забезпечують безпечний перетин великих і жвавих доріг, ізолюючи пішоходів від автомобільного руху); пішохідні зони (вулиці або площі, повністю закриті для автомобільного руху, що створює простір для прогулянок, торгівлі та відпочинку); світлофорне регулювання (пішоходи отримують можливість перетинати дорогу за сигналами світлофора, що синхронізується з транспортним рухом); островки безпеки (невеликі зони посередині широких доріг, які дозволяють пішоходам перетинати дорогу у два етапи) тощо.

Серед цих методів дуже популярними стають ДПП [2]. Вони дають можливість пішоходам перетинати перехрестя в будь-якому напрямку, включаючи по діагоналі, під час спеціальної фази світлофора, коли весь транспортний рух зупиняється. Такий підхід не лише підвищує ефективність перетину доріг, але й суттєво знижує ризик ДТП, особливо у щільно населених міських районах. Діагональні переходи дедалі частіше впроваджуються в сучасних містах, які прагнуть зробити свої вулиці безпечнішими та зручнішими для пішоходів.

Постановка проблеми. Світова практика вже давно демонструє ефективність діагональних переходів. В Україні подібний досвід уже впроваджений у деяких містах, проте м. Харків досі залишається без таких інноваційних рішень. Відсутність діагональних переходів у місті створює незручності для пішоходів та підвищує

ризик ДТП на жвавих перехрестях. Вчені ХНАДУ визнають нагальну необхідність впровадження таких рішень у Харкові, враховуючи його масштабну транспортну мережу та високу щільність населення. У зв'язку з цим актуальність дослідження полягає в обґрунтуванні потреби та розробці пропозицій щодо впровадження ДПП на перехрестях м. Харків. Через відсутність відповідної інфраструктури та можливості проведення експериментів у м. Харків, дослідження базуватиметься на аналізі успішного досвіду та спроб впровадження ДПП в інших містах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. ДПП, або так звані «пішохідні зебри Х», – це особливий тип перехрестя, де пішоходам дозволяється переходити дорогу в усіх напрямках одночасно, включаючи по діагоналі. Такі переходи створюються для покращення пішохідного руху і зниження кількості конфліктних ситуацій між пішоходами та ТЗ. Їх основними перевагами є те, що завдяки можливості перетину в будь-якому напрямку за один цикл світлофора, пішоходам не потрібно чекати двічі, щоб перетнути перехрестя у двох напрямках; зменшується ризик ДТП між пішоходами та ТЗ, оскільки всі автомобілі зупиняються, коли пішоходи мають «зелене світло»; такий формат переходу особливо корисний у місцях з великою кількістю пішоходів, наприклад, біля торгових центрів, навчальних закладів або на центральних площах міст.

Географія впровадження ДПП дуже широка: Шібуя (Токіо, Японія) – один з найвідоміших діагональних переходів у світі, по якому одночасно можуть переходити дорогу понад 3000 пішоходів; Oxford Circus (Лондон, Велика Британія) також має цей тип пішохідного переходу; перехрестя Friedrichstrasse/Kochstrasse (Берлін, Німеччина); Бельгія, Франція, Нідерланди та інші країни [3]. До речі, за підрахунками експертів, завдяки їх використанню ризик ДТП на дорогах зменшується до 10%. В 2019 році, як зазначено в Інтернет джерелах [4], Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України зайнялось розробкою проекту зміни ДБН, яка передбачала дозволити проектувати діагональні пішохідні переходи. Тоді відмічалось, що в Європі більшість пішохідних переходів – наземні, а не підземні, як в Україні і попри це, ДТП там в рази менше. Все завдяки розумному проектуванню вулиць і доріг, наприклад, облаштуванню на перехрестях наземних пішохідних переходів із «косою зеброю» – не під прямим кутом до тротуару, як зазвичай, а трохи навскоси. Завдяки таким переходам очікувалось підвищення видимості людей на переході – ризик наїзду або іншої ДТП набагато менший, а також підвищення уваги і самого пішохода, оскільки це змушує його дивитися в бік руху. ДПП були запроваджені в ПДР України в 2021 році. [5]. Вони позначаються дорожнім знаком 5.39 та спеціальною розміткою. Мета такого ноу-хау – максимально розвантажити перехрестя, де збирається багато пішоходів. ПДР передбачають, що переходити перехрестя по діагоналі можна за наявності відповідного дорожнього знаку та розмітки. При цьому такі переходи організовують виключно на перехрестях, що регулюються. Пішоходи можуть перетинати проїжджу частину по діагоналі, коли для автомобілів горить червоний сигнал світлофора. Про ДПП заговорили ще в 2015 році у Львові. Тож м. Львів став першим містом України, де у листопаді 2022 року з'явився такий перехід на перехресті вулиць Бандери, Антоновича та Русових. Такий нестандартний вид переходу, як зазначалось, слід застосовувати на тих ділянках, де є інтенсивний рух пішоходів і де їм треба

перетинати дві та більше доріг, щоб дістатися з точки А в точку Б. Ініціатори були впевнені, що завдяки діагональному переходу перейти дорогу можна буде швидше. Пізніше, в 2023 році, унікальний перехід був помічений в м. Одеса на перетині вулиць Катериненська та Ланжеронівська. Під час зеленого сигналу світлофора пішоходи можуть рухатися одразу кількома напрямками. Таке рішення спрощує перехід дороги та робить його безпечнішим та швидшим. У м. Дніпро перший ДПП з'явився в 2024 році на перехресті вулиць Королеви Єлизавети та Харківської, біля ТРЦ «Мост-Сіті», Для території поблизу Мост-Сіті, де завжди інтенсивний рух і пішоходів, і ТЗ це досить необхідне нововведення.

За кордоном давно ведуться роботи по вивченню ефективності функціонування перехрестя з ДПП. Зокрема, в [6] окрема пішохідна фаза з діагональним переходом є доцільною для підвищення безпеки пішоходів на перехрестях із високою інтенсивністю руху як пішоходів, так і ТЗ. Моделювання дорожнього руху показує, що така організація ефективна за наступних умов: на перехрестях із 2+2 смугами; при інтенсивностях пішоходів і ТЗ відповідно більше 900 піш./год та 1600 авт./год. Водночас ексклюзивна пішохідна фаза може бути впроваджена на перехрестях із низьким або середнім обсягом ТП незалежно від кількості пішоходів, оскільки це покращує загальну організацію руху та підвищує рівень безпеки.

В роботі [7] авторами доведено зворотнє, що впровадження окремих пішохідних фаз без діагонального переходу на односторонніх регульованих перехрестях значно підвищує безпеку пішоходів. Зазвичай ексклюзивна пішохідна фаза з діагональним переходом впроваджується для підвищення безпеки пішоходів на перехрестях із високою інтенсивністю пішохідного руху. Дослідження у м. Вільнюс продемонструвало, що рішення прибрати діагональні пішохідні переходи ефективно зменшує ризик ДТП до нуля, навіть на перехрестях із середньою чи низькою інтенсивністю пішохідного руху. Запропонований підхід є особливо актуальним для регульованих перехрестя, де впровадження діагональних переходів неможливе. Однак в цілому, результати підтверджують, що окремі пішохідні фази є дієвим інструментом для зниження аварійності та забезпечення безпечного середовища для всіх учасників дорожнього руху.

Для зменшення протиріч у висновках [6] і [7] варто врахувати, що кожна робота має свої межі застосування, а проведення нами аналізу повинно бути продовжено із залученням реальних даних про ДТП у різних містах і країнах та детального моделювання руху на перехрестях із різними конфігураціями. Тільки комплексний підхід, що поєднує безпеку та ефективність руху, дозволить визначити оптимальні умови для впровадження ДПП чи їх виключення.

Дослідження [8] підтверджує, що застосування методів машинного навчання, зокрема методу опорних векторів (SVM), дозволяє суттєво підвищити точність аналізу й прогнозування поведінки пішоходів на перехрестях. Цей підхід є ефективним інструментом для розробки інтелектуальних транспортних систем, які здатні оптимізувати процес управління пішохідним рухом; підвищити безпеку дорожнього руху завдяки прогнозуванню порушень правил; забезпечити більш точне моделювання сценаріїв дорожнього руху. У майбутньому впровадження таких технологій у розумних містах може сприяти зменшенню кількості ДТП, оптимізації ТП і створенню більш безпечного середовища для пішоходів та інших

учасників руху. Слід зазначити, що дане дослідження може бути корисним для аналізу та оптимізації ДПП, оскільки модель SVM, яка демонструє високу точність у прогнозуванні швидкості та ймовірності переходу, може бути застосована для аналізу специфічних сценаріїв поведінки пішоходів на діагональних переходах. Це може допомогти визначити ймовірність порушень пішоходами на діагональних переходах або передбачити, як пішоходи взаємодіятимуть із ТП на таких перехрестях. До того ж результати моделювання можуть використовуватися для налаштування світлофорів на діагональних переходах з урахуванням швидкості, інтенсивності руху пішоходів і ТЗ. Це сприятиме зниженню затримок для всіх учасників дорожнього руху. Аналіз порушень на перехрестях дозволяє ідентифікувати небезпечні зони, де пішоходи найчастіше ігнорують правила (наприклад, перетинають на червоне світло). Це може бути корисним для створення превентивних заходів або встановлення додаткових засобів контролю (камер, попереджувальних сигналів). Дослідження підтверджує, що використання машинного навчання може інтегруватися в інтелектуальні транспортні системи для керування діагональними переходами. Наприклад, впровадження адаптивного управління світлофорами, розробка систем оповіщення для водіїв і пішоходів про потенційні конфлікти. Дані, отримані з реальних перехрестів у дослідженні, можна адаптувати для моделювання діагональних переходів, що дозволить визначити, за яких умов діагональні переходи є найбільш ефективними та збалансувати безпеку й пропускну спроможність на складних перехрестях. Тож, дослідження з використанням машинного навчання й технологій розпізнавання зображень може суттєво підвищити ефективність впровадження ДПП. Воно дозволяє прогнозувати й аналізувати поведінку пішоходів у різних умовах, оптимізувати організацію руху та підвищити загальний рівень безпеки. Практичне застосування подібних досліджень у м. Харків поки що обмежене, оскільки такі переходи не впроваджені на ВДМ.

Дослідження в [9] аналізує ефективність впровадження ДПП («scramble crossing») на перехресті з існуючою довжиною циклу сигналу 79 с. Результати показують, що за наявних умов таке впровадження є доцільним. Автори рекомендують провести додаткові дослідження параметрів та обмежень для отримання більш точних результатів. Зокрема, слід детальніше проаналізувати швидкість обслуговування світлофорів, яка залежить від довжини перехрестя та поступового збільшення швидкості руху транспорту. Авторами запропоновані точні формули для розрахунку оптимальної тривалості сигналу для пішоходів, які можуть бути використані для уточнення тривалості сигналу на діагональному переході. Також варто врахувати, що деякі сигнали на перехрестях координуються з іншими поблизу розташованими перехрестями, і впровадження нового циклу може порушити потік трафіку в таких зонах. Подальші дослідження можуть включати впровадження діагонального переходу на певних перехрестях з оптимізацією системи в цілому та врахуванням взаємозв'язків між циклами світлофорів. Крім того, адаптація тривалості сигналів до різних періодів доби, коли змінюються ТП, дозволить більш ефективно використовувати перехрестя.

В [10] зазначається, що ДПП повинні використовуватися тільки у випадках, коли є реальна потреба для пішоходів перетинати перехрестя по діагоналі, і це повинно призводити до зменшення затримок як для пішоходів, так і для транспорту.

Враховуючи, що діагональні переходи можуть збільшити час пішохідної фази, це вимагає ретельного планування та встановлення відповідних знаків і інфраструктури для забезпечення безпеки та зручності всіх учасників дорожнього руху.

Авторами роботи [11] проаналізовано, як встановлення ДПП впливає на ефективність руху транспорту, використовуючи метод моделювання в програмному середовищі PTV Vision VISSIM. Результати показали, що при певному співвідношенні ТП (наприклад, коли співвідношення головної вулиці до другорядної 1:6) впровадження діагональних переходів може знижувати загальні затримки на перехрестях типів 2-на-1 і 3-на-1. Такі переходи підвищують ефективність роботи перехрестя, зокрема, коли на головній вулиці більший ТП, а на другорядній – менший, і коли довжина переходу для головної вулиці більша. Це дослідження може бути корисним для визначення умов, за яких слід впроваджувати ДПП для покращення ефективності дорожнього руху.

Слід також відмітити, що ще у 2002 році в м. Окленд (Каліфорнія) було впроваджено на перехресті поряд з традиційним способом перетинання вулиці, перехід по діагоналі. Основною метою роботи [12] була оцінка підвищення безпеки пішоходів на цьому перехресті в результаті впровадження «scramble crossing». Було проведено аналіз конфліктів між пішоходами та ТЗ та порушень пішоходів до і після зміни сигналізації, а також опитано пішоходів для вивчення їх ставлення та розуміння змін. Модифікація сигналізації в результаті призвела до статистично значного зменшення конфліктів між пішоходами та ТЗ, а також до статистично значного збільшення порушень пішоходів. Загалом, пішоходи зрозуміли зміну в роботі перехрестя та прийняли зміни у вигляді «scramble crossing»-сигналізації. Ці результати свідчать про те, що система «scramble crossing» в цілому була ефективною для покращення безпеки на перехресті. Збільшення кількості порушень, незважаючи на зменшення конфліктів, частково пояснюється тим, що певна частина пішоходів продовжувала незаконно переходити дорогу на «безпечній» пішохідній смузі (тобто на смузі, що паралельна руху транспорту, де немає можливості для конфліктів). Важливо, щоб сигнал «scramble crossing» контролювався протягом часу для того, щоб оцінити, наскільки зменшення конфліктів між ТЗ та пішоходами призводить до зменшення кількості травм та смертей серед пішоходів. Впровадження сигналу «scramble crossing» в Окленді виявилось ефективним у зниженні конфліктів між пішоходами та ТЗ, що сприяло покращенню безпеки на перехресті. Однак збільшення кількості порушень пішоходами, попри зменшення конфліктів, вказує на потребу в додатковій освіті та моніторингу цього виду сигналізації для оцінки її довгострокового впливу на зниження травм і смертельних випадків серед пішоходів.

Дослідження [13] вказує на необхідність врахування специфічних потреб різних груп пішоходів при проектуванні пішохідних переходів, зокрема для осіб з обмеженими можливостями. Виявлені прогалини в місцевих рекомендаціях та показниках Healthy Streets вказують на потребу в удосконаленні інструментів для визначення складних для пішоходів переходів. Це дослідження дозволяє створити більш ефективні механізми для адаптації існуючої інфраструктури, що покращить безпеку та зручність пішоходів, а також зробить процес адаптації інфраструктури більш проактивним і орієнтованим на потреби громадян. Це

дослідження може бути корисним для оцінки безпеки при впровадженні ДПП. Воно надає реалістичну оцінку місцевих рекомендацій з дизайну та показників Healthy Streets, а також вивчає важливі фактори, які можуть впливати на зручність і безпеку пішоходів при переходах. Зокрема, дослідження звертається до таких аспектів, як піковий трафік, складність і радіуси повороту для транспорту – ці метрики можуть бути використані для оцінки того, наскільки ДПП може стати бар'єром для пішоходів, зокрема для осіб з інвалідністю. Також, результати вказують на прогалини в місцевих дизайнерських рекомендаціях, що означає, що для успішного впровадження діагональних переходів важливо враховувати такі показники в інфраструктурі та адаптувати їх для полегшення пішохідного руху. Це дослідження надає корисні інсайти для покращення місцевих стандартів і створення більш безпечних та зручних умов для пішоходів, зокрема через ретрофітинг існуючих переходів або їх перепроєктування.

Аналіз наявних джерел ще раз підтвердив важливість та необхідність проведення досліджень щодо впровадження ДПП та оцінки їх ефективності в містах України. Вивчення міжнародного досвіду, а також існуючих практик національного рівня, показує, що діагональні переходи є потужним інструментом для покращення безпеки пішоходів, скорочення часу на перехід та зменшення затримок для всіх учасників дорожнього руху. Проте для досягнення максимального ефекту важливо не лише застосовувати ці рішення в певних умовах, а й ретельно дослідити, як вони впливають на транспортну інфраструктуру та пішохідний потік, особливо в умовах українських міст. Наявність таких досліджень дозволить забезпечити науково обгрунтовані рішення щодо проектування і реалізації діагональних переходів, а також адаптацію міжнародного досвіду до специфіки українських міст. Це, в свою чергу, допоможе оптимізувати процеси мобільності, покращити безпеку пішоходів і транспорту, а також забезпечити більш ефективне використання інфраструктури.

Тим більше, що у вітчизняних джерелах зовсім відсутні будь-які дослідження в цьому напрямку. Так, в [14] на основі аналізу статистики ДТП у країнах Європи, СНД та Україні, стверджувати, що забезпечення безпеки пішоходів є одним із ключових завдань дорожнього руху, а підняті пішохідні переходи – це ефективний інструмент для зменшення аварійності та підвищення рівня безпеки. Їх використання сприяє збереженню життя та здоров'я учасників дорожнього руху завдяки зниженню швидкості ТЗ та покращенню видимості пішоходів на проїзній частині. Такий підхід довів свою ефективність та потребує подальшого впровадження задля створення безпечнішого середовища на дорогах. На відміну від піднятих пішохідних переходів, питання ефективності ДПП в Україні практично не досліджене. Таким чином ми підійшли до формулювання мети дослідження.

Формулювання цілей статті. Метою дослідження є попередня оцінка ефективності функціонування перехрестя за рахунок впровадження на ньому ДПП, оскільки досвід інших країн демонструє їхню потенційну ефективність як у зниженні аварійності, так і в порівнянні з іншими схемами руху. Для реалізації мети необхідно провести дослідження дорожніх умов та параметрів транспортних і пішохідних потоків, на основі яких стане можливим розробити імітаційні транспортні моделі обраного перехрестя у програмному середовищі PTV Vision VISSIM [15].

Виклад основного матеріалу. Кафедрою організації і безпеки дорожнього руху ХНАДУ ведуться дослідження щодо можливості застосування ДПП в м. Харків. Відсутність реальних проєктів та пропозицій щодо впровадження ДПП в місті значно обмежує можливості науковців займатися дослідженням і вирішенням цього питання.

На основі аналізу вже існуючих діагональних перетинів, як і в Україні, так і за кордоном були сформовано критерії для введення ДПП:

1. Висока пішохідна інтенсивність (наявність пішохідних шляхів, що потребують безпечного та швидкого перетину дороги, особливо в місцях з високою кількістю пішохідних маршрутів або поблизу значної кількості центрів тяжіння).
2. Наявна складна структура перехрестя.
3. Спостереження за конфліктними ситуаціями між пішоходами та ТЗ.
4. Обмеження або неможливість стандартних переходів.
5. Діагональний перехід забезпечить підвищення видимості пішоходів.
6. Наявність світлофорного регулювання.
7. Наявність безпечних зон для пішоходів.
8. Низька швидкість руху транспорту (перехрестя з діагональними переходами повинні мати обмеження швидкості або використання інших методів зниження швидкості транспорту, щоб зменшити ризик ДТП з участю пішоходів).
9. Доступність для людей з обмеженими можливостями.
10. Кількість смуг руху (не більше трьох смуг на кожному підході до перехрестя).

Можливості застосування таких переходів в м. Харків є, оскільки в місті чимало великих перехресть із інтенсивним рухом пішоходів, особливо поблизу станцій метро «Історичний музей», «Університет», де діагональний перехід може оптимізувати рух пішоходів, скорочуючи час очікування на світлофорі. При правильному налаштуванні світлофорів усі ТП зупиняються одночасно, даючи пішоходам змогу перетинати вулиці в будь-якому напрямку. Слід відзначити і естетичне оновлення міста, коли діагональні переходи додають сучасності міській інфраструктурі, що привертає увагу туристів, якщо такі переходи оформити креативно. Але місто може стикнутися з рядом проблем: через велику кількість перехресть із високою щільністю руху ТЗ, діагональний перехід може спричинити затримки для транспорту, якщо не буде ретельно спланованим; додаткові витрати, пов'язані з налаштуванням світлофорів; новий формат переходу може бути незвичним для мешканців міста, тому потрібна інформаційна кампанія, щоб навчити користуватися переходом.

В даній статті продемонстровано обґрунтування ефективності застосування таких переходів для перехрестя вулиць Європейська – Патріарха Мстислава – Остапа Вишні в м. Полтава (див. рис. 1). Вибір даного перехрестя обумовлений появою в червні 2023 року петиції [16], суть якої полягає у необхідності забезпечення безпеки дорожнього руху на даному перехресті, де регулярно трапляються ДТП, зокрема за участі дітей. З огляду на близьке розташування школи № 27 та інтенсивний рух транспорту, мешканці міста звернулись з проханням встановити додаткові сегменти світлофора, щоб забезпечити безпечний перехід доріг для пішоходів, особливо дітей, а також терміново демонтувати дорожній

знак «додаткова зелена стрілка» на світлофорі через обмежену видимість для водіїв та пішоходів під час руху. Оскільки дане перехрестя є аварійно небезпечним та становить загрозу життю і здоров'ю громадяни, наголошували ще тоді на невідкладності вжиття відповідних заходів для забезпечення безпеки всіх учасників дорожнього руху. Але досі проблема на перехресті не вирішена. А запит на безпечний перехід проїзної частини пішоходами вимагає впровадження ефективних рішень. Тому демонстрація такого нововведення в м. Полтава, як впровадження діагонального переходу, може стати пілотним проектом, який можна використовувати для аналізу й подальшого впровадження в інших містах, зокрема в м. Харків.

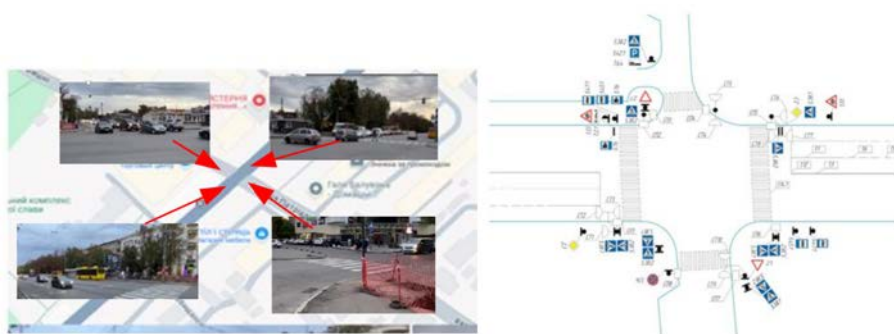


Рис. 1. Перехрестя вулиць Європейська – Патріарха Мстислава – Остапа Вишні в м. Полтава

Перевагою впровадження пілотного проекту в м. Полтава може бути й те, що в місті менший обсяг автомобільного руху порівняно з великими містами, зокрема м. Харків. Це зменшує ризики транспортних затримок при тестуванні діагонального переходу. Обраний перехід може стати зразком для спостереження, як це нововведення впливатиме на трафік, безпеку та звички пішоходів. Оскільки є петиція, місцеві жителі вже готові до діалогу та співпраці, що збільшує ймовірність успішного запуску. Успішна реалізація проекту в Полтаві може переконати владу інших міст у доцільності впровадження таких переходів.

На даний час на перехресті вулиць Європейська – Патріарха Мстислава – Остапа Вишні пофазний роз'їзд в дві фази. Нами запропоновано два розглянути два варіанти роз'їзду: введення третьої пішохідної фази з діагональним пішохідним переходом (див. рис. 2 (а)) та з рухом пішоходів по периметру (див. рис. 2 (б)).

Слід зазначити, що при розробці циклу світлофорного регулювання були враховані аспекти оптимізації значних поворотних потоків, зокрема аналізувались варіанти раннього та пізнього старту сигналів. Однак детальне дослідження їх впливу на транспортні та пішохідні потоки виходить за межі завдань даного дослідження. Тож, в результаті моделювання дорожнього руху (див. рис. 3) нами отримані значення показників ефективності функціонування перехрестя (затримки ТЗ і пішоходів, викиди шкідливих речовин та палива, довжина затору), які свідчать про переваги впровадження діагонального пішохідного переходу (див. рис. 4).

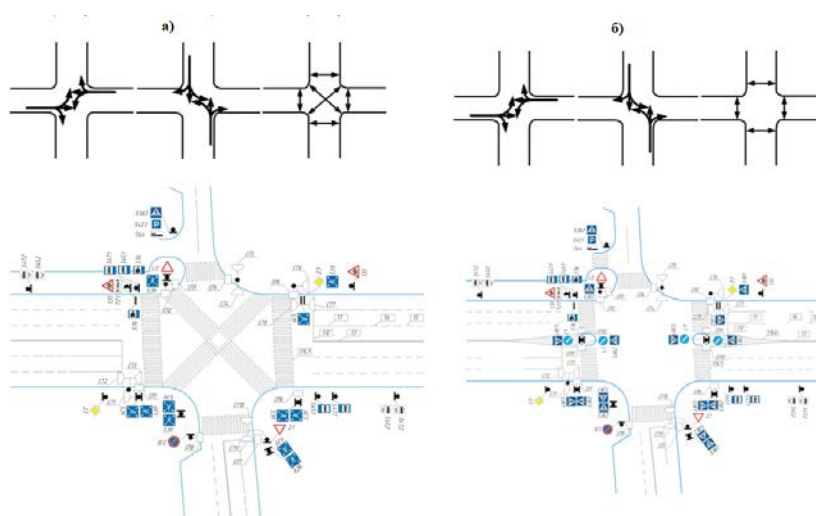


Рис. 2. Запропоновані схеми пофазного роз'їзду на перехресті



Рис. 3. Імітація дорожнього руху при різних варіантах схем руху пішоходів в програмному середовищі PTV Vision VISSIM

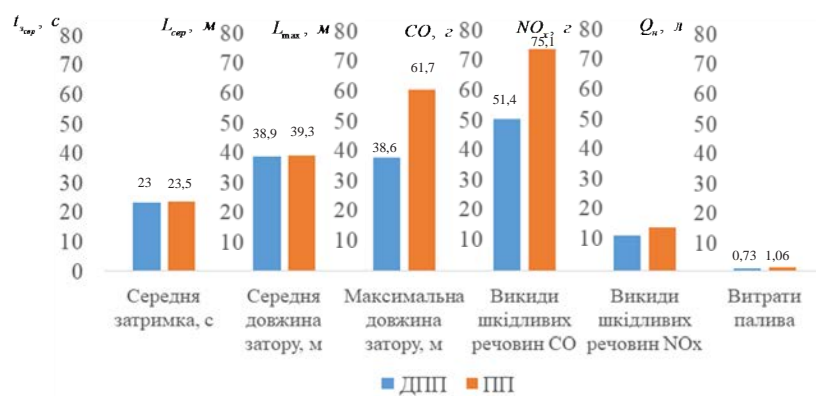


Рис. 4. Показники ефективності функціонування перехрестя, отримані в результаті моделювання

Висновки. В результаті проведеного моделювання та комплексного аналізу функціонування досліджуваного перехрестя отримано важливі кількісні критерії, зокрема: затримки руху ТЗ і пішоходів, обсяг витрат палива, а також довжину транспортних заторів. Отримані результати демонструють, що впровадження ДПП є більш ефективним рішенням порівняно зі стандартною схемою організації руху. Аналіз за всіма зазначеними параметрами вказує на середнє зниження відповідних показників приблизно на 10%, що підтверджує доцільність впровадження ДПП з точки зору покращення пропускнуої здатності перехрестя, зменшення енерговитрат ТЗ та мінімізації затримок руху. Окрім цього, прогнозоване скорочення довжини транспортних заторів позитивно вплине на безпеку руху та екологічний стан прилеглої території. Враховуючи масштабну транспортну мережу та високу щільність населення м. Харків, впровадження ДПП може суттєво підвищити безпеку пішоходів, зменшити конфлікти між транспортними та пішохідними потоками, а також покращити загальну організацію дорожнього руху. Результати моделювання підтверджують доцільність цього рішення для міста з такою інтенсивною транспортною інфраструктурою, як м. Харків.

ЛІТЕРАТУРА

1. South Australian walking strategy 2022–2032. More people walking more often; all ages, all abilities. URL: https://www.wellbeingsa.sa.gov.au/assets/downloads/walking-campaign/21025.14-Walking-Strategy-Documents-2022-2032_FINAL.pdf
2. Pedestrian planning and design guide. *NZ Transport Agency*, October 2009 ISBN 978-0-478-35228-3 (online). URL: <https://www.nzta.govt.nz/assets/resources/pedestrian-planning-guide/docs/pedestrian-planning-guide-superseded.pdf> (дата звернення 21.01.2025)
3. Francis, E. (2023). Impacts of Diagonal Crosswalk Misuse. Civil Engineering Undergraduate Honors Theses Retrieved from <https://scholarworks.uark.edu/cveguht/81>
4. В Україні з'являться діагональні пішохідні переходи. УНІАН: веб-сайт. URL: <https://www.unian.ua/economics/transport/10514073-v-ukrajini-z-yavlyatsya-diagonalni-pishohidni-perehodi.html> (дата звернення 24.01.2025)
5. В Одесі з'явився перший діагональний пішохідний перехід: що це та як працює? Hotline Finance: веб-сайт. URL: <https://hotline.finance.ua/articles/v-odesi-z-yavivsy-pershiiy-diagonalniy-pishohidniy-perehid-shcho-ce-ta-yak-pracyuye> (дата звернення 25.01.2025)
6. Grigonis, V., Kondratovič, V., Palevičius, V., Juozevičiūtė, D., Karpavičius, T., & Smirnovs, J. (2023). Performance Analysis of One-Level Signalized Urban Intersections with Exclusive Pedestrian Phases and Diagonal Crossings. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 18(4), 65-89. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2023-18.619>
7. Juozevičiūtė, D., & Grigonis, V. (2022). Evaluation of Exclusive Pedestrian Phase Safety Performance at One-Level Signalized Intersections in Vilnius. *Sustainability*, 14(13), 7894. <https://doi.org/10.3390/su14137894>
8. Cai, J., Wang, M., & Wu, Y. (2024). Research on Pedestrian Crossing Decision Models and Predictions Based on Machine Learning. *Sensors*, 24(1), 258. <https://doi.org/10.3390/s24010258>

9. Michelle Leung, Sam Maggs, Svyatoslav Glazyrin (2012). Intersection Optimization Analysis: Cambie & W. Broadway, Vancouver. Analytics Now 2012 Edition. ANALYTICS NOW: веб-сайт. URL: <https://journals.lib.sfu.ca/index.php/analytics-now/article/view/31/15>
10. Guidelines for Pedestrian Crossing Facilities at Traffic Control Signals (2023). Mainroad Western Australia: веб-сайт. URL: <https://www.mainroads.wa.gov.au/globalassets/technical-commercial/technical-library/road-and-traffic-engineering/traffic-management/traffic-signals/guidelines-for-pedestrian-crossing-facilities-at-traffic-signals-v2.pdf>
11. Doyoung Jung, Dongmin LEE, Jinwoo Jun, Daecheol HAN (2017). Analysis of the Effects of Scrambled Crosswalk Installation Depending on the Types of Intersections Using VISSIM. International Journal of Highway Engineering Vol.19 No.3 Pp.71-81. DOI: <https://doi.org/10.7855/IJHE.2017.19.3.071>
12. Bechtel, A. K, MacLeod, K. E, & Ragland, D. R. (2003). Oakland Chinatown Pedestrian Scramble: An Evaluation. UC Berkeley: Safe Transportation Research & Education Center. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/3fh5q4dk>
13. T. Bozovic, E. Hinckson, M. Smith (2024). Pedestrian crossings: Design recommendations do not reflect users' experiences in a car-dominated environment in Auckland, New Zealand. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* Volume 187, September 2024, 104169 <https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104169>
14. Нагребельна Л.П., Беленчук О.В., Кононенко А.О. (2018). Підняті пішохідні переходи, як засіб забезпечення безпеки пішоходів. *Автомобільні дороги. Безпека руху*. Автошляховик України, № 2. С. 47-50. URL: <https://surl.li/jwpeus>
15. PTV VISSIM: first steps tutorial. Germany. Ptv planning transport. Verkehr ag. 2021. P. 37
16. Електронні петиції. Полтавська міська рада: веб-сайт. URL: <https://petition.rada-poltava.gov.ua/petition/view?id=196> (дата звернення 02.12.2024).

REFERENCES

1. South Australian walking strategy 2022–2032. More people walking more often; all ages, all abilities. URL: https://www.wellbeingsa.sa.gov.au/assets/downloads/walking-campaign/21025.14-Walking-Strategy-Document-2022-2032_FINAL.pdf
2. Pedestrian planning and design guide. *NZ Transport Agency*, October 2009 ISBN 978-0-478-35228-3 (online). URL: <https://www.nzta.govt.nz/assets/resources/pedestrian-planning-guide/docs/pedestrian-planning-guide-superseded.pdf> (date of application 21.01.2025)
3. Francis, E. (2023). Impacts of Diagonal Crosswalk Misuse. Civil Engineering Undergraduate Honors Theses Retrieved from <https://scholarworks.uark.edu/cveguht/81>
4. Diagonal pedestrian crossings will appear in Ukraine. UNIAN: website [V Ukraini zivliatsia diahonalni pishokhidni perekhody. UNIAN: veb-sait.] URL: <https://www.unian.ua/economics/>

- transport/10514073-v-ukrajini-z-yavlyatsya-diagonalni-pishohidni-perehodi.html (date of application 24/01/2025) [in Ukrainian]
5. The first diagonal pedestrian crossing appeared in Odesa: what is it and how does it work? Hotline Finance: website. [V Odesi z'iavyvsia pershyi diahonalnyi pishokhidnyi perekhid: shcho tse ta yak pratsiuie? Hotline Finance: veb-sait.] URL: <https://hotline.finance.ua/articles/v-odesi-z-yavyvsya-pershyi-diagonalniy-pishohidniy-perehid-shcho-ce-ta-yak-pracyuye> (date of application 25.01.2025) [in Ukrainian]
 6. Grigonis, V., Kondratovič, V., Palevičius, V., Juozevičiūtė, D., Karpavičius, T., & Smirnovs, J. (2023). Performance Analysis of One-Level Signalized Urban Intersections with Exclusive Pedestrian Phases and Diagonal Crossings. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 18(4), 65-89. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2023-18.619>
 7. Juozevičiūtė, D., & Grigonis, V. (2022). Evaluation of Exclusive Pedestrian Phase Safety Performance at One-Level Signalized Intersections in Vilnius. *Sustainability*, 14(13), 7894. <https://doi.org/10.3390/su14137894>
 8. Cai, J., Wang, M., & Wu, Y. (2024). Research on Pedestrian Crossing Decision Models and Predictions Based on Machine Learning. *Sensors*, 24(1), 258. <https://doi.org/10.3390/s24010258>
 9. Michelle Leung, Sam Maggs, Svyatoslav Glazyrin (2012). Intersection Optimization Analysis: Cambie & W. Broadway, Vancouver. Analytics Now 2012 Edition. ANALYTICS NOW: website URL: <https://journals.lib.sfu.ca/index.php/analytics-now/article/view/31/15>
 10. Guidelines for Pedestrian Crossing Facilities at Traffic Control Signals (2023). Mainroad Western Australia: website URL: <https://www.mainroads.wa.gov.au/globalassets/technical-commercial/technical-library/road-and-traffic-engineering/traffic-management/traffic-signals/guidelines-for-pedestrian-crossing-facilities-at-traffic-signals-v2.pdf>
 11. Doyoung Jung, Dongmin LEE, Jinwoo Jun, Daecheol HAN (2017). Analysis of the Effects of Scrambled Crosswalk Installation Depending on the Types of Intersections Using VISSIM. *International Journal of Highway Engineering* Vol.19 No.3 Pp.71-81. DOI: <https://doi.org/10.7855/IJHE.2017.19.3.071>
 12. Bechtel, A. K, MacLeod, K. E, & Ragland, D. R. (2003). Oakland Chinatown Pedestrian Scramble: An Evaluation. UC Berkeley: Safe Transportation Research & Education Center. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/3fh5q4dk>
 13. T. Bozovic, E. Hinckson, M. Smith (2024). Pedestrian crossings: Design recommendations do not reflect users' experiences in a car-dominated environment in Auckland, New Zealand. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* Volume 187, September 2024, 104169 <https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104169>
 14. Nahrebelna L.P., Belenchuk O.V., Kononenko A.O. (2018). Raised pedestrian crossings as a means of ensuring pedestrian safety [Pidniati pishokhidni perekhody, yak zasib zabezpechennia bezpeky pishokhodiv] *Automobile roads. Traffic safety. Avtoshliakhovyk Ukrainy*, No. 2. C. 47-50. [in Ukrainian]
 15. PTV VISSIM: first steps tutorial. Germany. Ptv planning transport. Verkehr ag. 2021. P. 37
 16. Electronic petitions. Poltava City Council: website. [Elektronni petytsii. Poltavska miska rada: veb-sait.] URL: <https://petition.rada-poltava.gov.ua/petition/view?id=196> (date of application 02.12.2024). [in Ukrainian]

НОТАТКИ

Наукове видання

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

Випуск 1(24), 2025

Засновник – Одеський національний морський університет

*Українською
та англійською мовами*

Видається з жовтня 2016 р.

Формат 70×108/16. Гарнітура Times New Roman.
Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 15,11.
Замов. № 0425/293. 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 1(24), 2025

Founded by Odessa National Maritime University

In Ukrainian and English

Since October 2016

Format 70×108/16. Times New Roman Font.
Offset. Digital printing. Conventional printed sheet 15,11.
Order No 0425/293. 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