

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКИЙ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

# РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

*Науковий журнал*

**ВИПУСК 4(15), 2022**

*Заснований у жовтні 2016 року*



Видавничий дім  
«Гельветика»  
2022

ОДЕСЬКИЙ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ  
НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 4(15)  
2022

Заснований у жовтні 2016 року

Виходить 4 рази на рік

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

На підставі Наказу Міністерства освіти і науки України № 1188 від 24.09.2020 р.  
(додаток 5) журнал внесений до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») у галузі економічних та технічних наук (051 – Економіка, 073 – Менеджмент, 133 – Галузеве машинобудування, 271 – Річковий та морський транспорт, 275 – Транспортні технології (за видами)).

**Засновник:**

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

**Редакційна колегія:**

Головний редактор – д.т.н., проф. *Руденко С.В.*  
Заступник головного редактора – к.т.н., доц. *Немчук О.О.*  
Відповідальний секретар – к.е.н., доц. *Мельников С.В.*

**Члени редакційної колегії:**

д.т.н., проф. *Варбанець Р.А.*, ОНМУ;  
д.т.н., проф. *Дубровський М.П.*, ОНМУ;  
д.т.н., проф. *Єзупов К.В.*, ОНМУ;  
д.е.н., проф. *Ланкіна І.О.*, ОНМУ;  
д.е.н., проф. *Постан М.Я.*, ОНМУ;  
д.т.н., проф. *Малаксіано М.О.*, ОНМУ;  
д.т.н., проф. *Пітерська В.М.*, ОНМУ;  
д.т.н., проф. *Шахов А.В.*, ОНМУ;  
д.т.н., проф. *Гасанов В.*, Азербайджанська державна морська академія, Азербайджан;  
д.т.н., доц. *Кириллова О.В.*, ОНМУ;  
к.т.н., доц. *Садигов В.* Азербайджанська державна морська академія, Азербайджан;  
*Філіна-Давидович Л.С.*, PhD, DSc, Західноморський технологічний університет у Щецині, Польща;  
*Аймелек Мурат*, PhD, Ізмірський Університет імені Катіпа Челебі, Туреччина;  
*Любоміров Слав Ясенов*, PhD, Пловдивський університет імені Паїсія Гілендарського, Болгарія;  
*Нам Кю Парк*, PhD, Університет ТонгМьонг, Південна Корея;

*Малеки Вішкаї Бехзад*, PhD, Вільний міжнародний університет соціальних досліджень імені Гвідо Карлі, Італія;  
*Нгок Ан Мін*, PhD, Технологічний університет Кочі, Японія;  
*Цисар Чаба*, PhD, Будапештський університет технології та економіки, Угорщина;  
*Дашковський С.*, DSc, Вюрцбурзький університет імені Юліуса та Максиміліана, Німеччина;  
*Духовник Йозе*, DSc, Люблянський університет, Словенія;  
*Колмикова А.*, DSc, Бременський університет, Німеччина;  
*Клюс О.*, DSc, Морська Академія в Щецині, Польща;  
*Медведев О.*, DSc, Інститут транспорту та зв'язку, Латвія;  
*Мезітіс Марекс*, DSc, Транспортна академія, Латвія;  
*Попова О.*, DSc, Інститут транспорту та зв'язку, Латвія.

Рекомендовано до друку Вченою радою  
Одеського національного морського університету  
(протокол № 6 від 21 грудня 2022 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.

ISSN 2616-7360

© Одеський національний морський університет, 2022

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

ODESSA  
NATIONAL MARITIME UNIVERSITY

# TRANSPORT DEVELOPMENT

*Scientific journal*

**ISSUE 4(15), 2022**

*Founded in October 2016*



Publishing House  
"Helvetica"  
2022

ODESSA  
NATIONAL MARITIME UNIVERSITY  
TRANSPORT DEVELOPMENT  
SCIENTIFIC JOURNAL

№ 4(15)  
2022

Founded in October 2016

Frequency: four times a year

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

Pursuant to the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 1188  
dated 24.09.2020 (Appendix 5), the journal is included in the List of scientific professional publications  
of Ukraine (category “B”) in the field of economic and technical sciences  
(051 – Economics, 073 – Management, 133 – Industry engineering,  
271 – River and sea transport, 275 – Transport technologies (by type).

**Founder:**

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

**Editorial Board:**

Editor-in Chief: Doctor of Engineering, Professor *Rudenko S.V.*  
Deputy Editor-in Chief: PhD in Engineering, Associate Professor *Nemchuk O.O.*  
Executive Secretary: PhD in Economics, Associate Professor *Melnykov S.V.*

**Editorial Board Members:**

DSc, Prof. *Varbanets R.A.*, ONMU;  
DSc, Prof. *Dubrovskiy M.P.*, ONMU;  
DSc, Prof. *Yehupov K.V.*, ONMU;  
DSc, Prof. *Lapkina I.O.*, ONMU;  
DSc, Prof. *Postan M.Ia.*, ONMU;  
DSc, Prof. *Malaksiano M.O.*, ONMU;  
DSc, Associate Professor *Piterska V.M.*, ONMU;  
DSc, professor *Shakhov A.V.*, ONMU;  
Doctor of Engineering, Prof. *Gasnov V.*, Azerbaijan  
State Marine Academy, Azerbaijan  
DSc, Prof. *Kyrylova O.V.*, ONMU;  
PhD in Engineering, Associate Professor *Sadigov V.*,  
Azerbaijan State Marine Academy, Azerbaijan;  
DSc, Prof. *L.S. Filina-Dawidowicz*, West Pomeranian  
University of Technology, Szczecin, Poland;  
*Aymelek Murat*, PhD, Izmir Katip Celebi University,  
Turkey;  
*Lyubomirov Slavi Yasenov*, PhD, University of Plovdiv  
Paisii Hilendarsk, Bulgaria;

*Maleki Vishkaei Behzad*, PhD, Luiss University, Italy;  
*Nam Kyu Park*, PhD, TongMyong University, South  
Korea;  
*Ngoc An Minh*, PhD, Kochi University of Technology,  
Japan;  
*Csiszar Csaba*, PhD, Budapest University  
of Technology and Economics, Hungary;  
*Dashkovskiy S.*, DSc, Julius-Maximilians University  
of Wurzburg, Germany;  
*Duhovnik Joze*, DSc, University of Ljubljana,  
Slovenia;  
*Kolmykova A.*, DSc, University of Bremen, Germany;  
*Klyus O.*, DSc, Maritime University of Szczecin,  
Poland;  
*Medvedev A.*, DSc, Transport and telecommunication  
institute, Latvia;  
*Mezitis Mareks*, DSc, Transport Academy, Latvia;  
*Popova Je.*, DSc, Transport and telecommunication  
institute, Latvia.

Recommended for printing by the Academic Council of Odessa National Maritime University  
(Minutes No 6 dated December 27, 2022)

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**

- L.V. Kosharska, V.P. Brednyova, Yu.O. Nikiforov**  
Research of the regularities of “green” energy and the world trends of its development.....7

**РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ**

- А.І. Головань, І.П. Гончарук, А.О. Волошин, О.М. Шумило,  
Ю.О. Никифоров, О.В. Шапов**  
Дослідження шляхів зменшення забруднення повітря від судноплавства.....15
- Б.О. Єрмоленко**  
Аналіз автономних надводних суден для вирішення задач  
гідрографічного моніторингу.....24
- О.О. Kanifolskyi, V. Ruggiero**  
Approximate estimation of propulsion for high-speed displacement vessels.....33
- О.М. Shumylo, V.O. Yarovenko, O.I. Zaritska**  
Dynamic similarity of electric ships’ propulsive complexes .....43
- О.М. Шумило**  
Оптимізація розмірної модернізації пасажирських суден  
з урахуванням енергоефективності.....58

**ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)**

- О.А. Кравченко, С.С. Боровик, І.І. Тихоніна**  
Обґрунтування структури і формування плану роботи офшорного флоту  
при обслуговуванні видобувних платформ.....78
- О.Г. Kupraty**  
Modern method of compass error calculation by the celestial bodies using  
MATLAB environment.....95
- Д.М. Решетков, М.А. Бондарюк, С.П. Онищенко**  
Сутність, переваги та існуючий досвід розвитку розумних портів.....108
- В.Ю. Федоров, К.Г. Ковцур, Н.В. Птиця**  
Взаємодія видів транспорту: особливості обслуговування  
транспортних засобів в пунктах переробки вантажів.....123
- Г.Р. Фоменко**  
Аналіз європейського досвіду проектування функціональних  
класифікацій міських вулиць і доріг.....131
- О.В. Шкуренко, В.А. Будник, М.Є. Перепічко**  
Стратегічні орієнтири функціонування та розвитку портових терміналів  
як складової транспортної інфраструктури мультимодальних перевезень.....140

C O N T E N T S

---

---

**ECONOMY**

- L.V. Kosharska, V.P. Brednyova, Yu.O. Nikiforov**  
Research of the regularities of “green” energy and the world trends of its development....7

**RIVER AND SEA TRANSPORT**

- A.I. Golovan, I.P. Honcharuk, A.O. Voloshyn, O.M. Shumylo,  
Yu.O. Nykyforov, O.V. Shamov**  
Research of ways to reduce air pollution from shipping.....15
- B.O. Yermolenko**  
Analysis of autonomous surface vehicles for solving hydrographic monitoring tasks....24
- O.O. Kanifolskyi, V. Ruggiero**  
Approximate estimation of propulsion for high-speed displacement vessels.....33
- O.M. Shumylo, V.O. Yarovenko, O.I. Zaritska**  
Dynamic similarity of electric ships’ propulsive complexes .....43
- O.M. Shumylo**  
Optimization of passenger vessels dimensional modernization taking into  
account the energy efficiency.....58

**TRANSPORT TECHNOLOGIES (BY TYPE)**

- O.A. Kravchenko, S.S. Borovyk, I.I. Tikhonina**  
Justification of the structure and formation of the work plan of the offshore fleet  
in maintenance of extraction platforms.....78
- O.G. Kupraty**  
Modern method of compass error calculation by the celestial bodies using  
MATLAB environment..... 95
- D.M. Reshetkov, M.A. Bondaryuk, S.P. Onyshchenko**  
Essence, advantages and existing experience of the smart ports development.....108
- V.Yu. Fedorov, K.H. Kovtsur, N.V. Ptytsia**  
Interaction of transport modes: features of servicing vehicles  
at cargo-handling facilities..... 123
- H.R. Fomenko**  
Analysis of European experience in designing functional classifications  
of city streets and roads..... 131
- O.V. Shkurenko, V.A. Budnyk, M.E. Perepichko**  
Strategic guidelines for the functioning and development of port terminals  
as a component of the transport infrastructure of multimodal transportation.....140

## EKOHOMIKA

UDC 330(045)

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.01>

### RESEARCH OF THE REGULARITIES OF “GREEN” ENERGY AND THE WORLD TRENDS OF ITS DEVELOPMENT

L.V. Kosharska<sup>1</sup>, V.P. Brednyova<sup>2</sup>, Yu.O. Nikiforov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Candidate of Engineering Sciences,  
Professor at the Department of “Technical Service and Repair of Ships”,  
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0001-5575-3745

<sup>2</sup>Candidate of Engineering Sciences,  
Professor at the Department of “Descriptive Geometry and Engineer Graphics”,  
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-3005-2384

<sup>3</sup>Candidate of Engineering Sciences,  
Professor at the Department of “Technical Service and Repair of Ships”,  
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-8901-6935

#### **Summary**

**Introduction.** The article analyzes the causes of the global energy crisis and the role of green energy in its emergence, examines the patterns and global trends of its development, as well as the technological and socio-economic features of its spread. In the 70s of the XX century, green energy, based on the use of new technologies for the production of electricity from renewable sources, gained serious popularity as part of a growing environmental movement. But it wasn't until the beginning of the 21st century that a real breakthrough was made in this area, which may eventually allow these technologies to displace fossil fuels (coal, oil and natural gas) as the main source of energy. **Purpose.** The main goal of the article is to find an answer to the question of to which extent it is possible to achieve the energy transition in the near future, as well as to carry out a critical analysis of published calculations of humanity energy consumption humanity in 2050, based on the need to significantly reduce the gap in the per capita energy consumption of the population of developed countries. **Results.** The authors researched the prerequisites and prospects for the development of renewable energy and considered the world experience of using renewable energy during the new Fourth Industrial Revolution, the feature of which, unlike the previous three, is a special account of the anthropogenic impact of activities on the environment. It is shown that the development of technologies of RES can be a driver of innovative modernization of the economy and a source of formation of a truly green economy, characterized by high-tech solutions, energy independence and reduced impact on the environment. **Conclusions.** Today, the energy problem is one of the most relevant for all mankind.

*Traditional sources such as oil, gas and other fossils are gradually becoming more scarce, expensive and, of course, environmentally. This is why solar panels, wind and solar farms, hydroelectric plants, as well as bioreactors are becoming so popular today as emerging sources of alternative or green energy, which will be discussed in more detail below. The production of electricity from RES is growing in various countries of the world, and this trend will continue in the future, so research in this direction must be continued.*

**Key words:** energy crisis, green energy, energy transition, industrial revolution, renewable energy sources.

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ЗЕЛЕНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ТА СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ ЇЇ РОЗВИТКУ

Л.В. Кошарська<sup>1</sup>, В.П. Бредньова<sup>2</sup>, Ю.О. Нікіфоров<sup>3</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доцент кафедри «Технічне обслуговування і ремонт суден»,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0001-5575-3745

<sup>2</sup>к.т.н., професор кафедри «Нарисна геометрія та інженерна графіка»,  
Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-3005-2384

<sup>3</sup>к.т.н., професор, завідувач кафедри «Технічне обслуговування і ремонт суден»,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-8901-6935

#### **Анотація**

**Вступ.** У статті аналізуються причини світової енергетичної кризи та роль зеленої енергетики у її виникненні, досліджуються закономірності та світові тенденції її розвитку, а також технологічні та соціально-економічні особливості її поширення. У 70-х роках ХХ ст. зелена енергетика, заснована на використанні нових технологій виробництва електроенергії з відновлюваних джерел, набула серйозної популярності як частина екологічного руху, що зростає. Але лише на початку ХХІ ст. у цій галузі було зроблено справжній прорив, який, можливо, згодом дозволить цим технологіям витіснити викопне паливо (вугілля, нафту та природний газ) як основного енергоносія. Основною **метою** статті є пошук відповіді на питання, наскільки можливо досягти енергопереходу в найближчі терміни, а також проведення критичного аналізу опублікованих результатів і розрахунків потреби людства в енергії у 2050 р., виходячи з необхідності значного скорочення розриву в душовому енергоспоживанні населення розвинених країн. **Результати.** Авторами досліджені передумови і перспективи розвитку відновлюваної енергетики та розглянуто світовий досвід використання відновлюваної енергетики у період нової Четвертої промислової революції, особливістю якої, на відміну від трьох попередніх, є особливий облік антропогенного впливу діяльності на довкілля. Показано, що розвиток технологій відновлюваних джерел енергії може бути драйвером інноваційної модернізації економіки та джерелом формування «зеленої» економіки, що характеризується високою технологічністю, енергетичною незалежністю та мінімальним впливом на навколишнє середовище.

**Висновки.** *Енергетична проблема сьогодні є однією з найактуальніших для всього людства. Традиційні джерела, такі як нафта, газ та інші копалини, поступово, стають дорожчими і, звичайно ж, завдають величезної шкоди навколишньому середовищу. Саме тому сонячні батареї, вітрові та гідроелектростанції, а також біореактори стають настільки популярними сьогодні. Всі вони відносяться до альтернативних або зелених джерел енергії, про що йтиметься нижче. Виробництво електроенергії з ВДЕ зростає в різних країнах світу, і ця тенденція в перспективі збережеться, тому дослідження в цьому напрямку необхідно продовжувати.*

**Ключові слова:** *енергетична криза, «зелена енергетика», енергетичний перехід, промислова революція, відновлювані джерела енергії (ВДЕ).*

### **Introduction**

The modern society lives in an unstable, and unpredictable world. The 21st century imposed on the world a challenging environmental agenda addressing which holds a key to the prosperous future of humanity. The “green transformation” became a buzz word in the energy sector and has been gaining enormous momentum and gathering support worldwide. Green energy is defined as produced in a process using alternative sources, inexhaustible or renewable, as compared to fossil fuels. Furthermore, green energy solutions produce significantly less greenhouse gases and other harmful substances whereas requiring much lower service costs after commissioning. The effectiveness of green energy is largely determined by geographical location allowing easier implementation of solar farms in regions with intense solar radiation. Such traditional renewable organic materials as wood, peat, etc. are not environmentally friendly when used as energy sources or in other words are not green due to production of carbon dioxide. Another good example of green energy technologies that releases carbon back into the atmosphere is processing of organic waste. Implementation of wind and solar solutions is impossible without significant subsidies at the expense of traditional energy, making transition to these types of energy in market economy hard to achieve. Despite the fact that many countries followed Italy in abandoning nuclear energy and shutting down the power plants, more than thirty countries worldwide are still operating nuclear power plants. Belgium, Germany, Spain, Switzerland, Taiwan implement a long-term policy of abandoning nuclear energy, etc. [1, pp. 14-21; 2-4 etc.].

### **Formulation of the problem**

Technically, climate change could be regarded as the result of an increase in concentration of greenhouse gases or an increase in emissions into the atmosphere. The task of reducing this concentration should include development of natural carbon depositing ecosystems to compensate for the negative consequences of anthropogenic emissions from the burning of fossil fuels. The purpose of this study is to analyze the global energy crisis and energy redistribution during the fourth industrial revolution, to identify the priority directions for the development of alternative green energy and renewable energy sources. The authors used the following research methods: the method of theoretical analysis, the method of comparison and generalization of information. **Analysis of recent studies** and publications shows the high significance of the problem under consideration.

### **Main material discussion**

It is generally acknowledged that production of efficient energy is one of the main factors of economic growth, labor productivity as well as individual quality of life. The energy consumers vary from private households to large industrial parks. As a result of population growth and industrial development, energy consumption in the world has increased more than fourteen times over the past hundred years [5, c. 10-20; 6; 7, pp. 16-17; 10, pp. 256-276 etc.].

One of the notable phenomena of recent years has been the energy transformation, that combines technologies for increasing of energy efficiency and technologies for the use of energy produced by renewable energy sources which allows for simultaneous development in several directions. The use of alternative energy accelerates the modernization of the economy, increases the level of economic security of national economies, which fundamentally changes the quality of economic growth. Development of alternative energy sources is a powerful driver for innovation and the basis for the formation of a low carbon green economy of the future, characterized by high-tech solutions, energy security and reduced impact on the environment. Alternative energy sources also reduce dependence of the national economies on fossil fuels.

Oil and gas sources will gradually disappear replaced by the RES. To the most explored sources of renewable energy belong solar, wind, water, including sewage, tides, natural water bodies waves, geothermal sources, land, air, water, biological mass, biological gas. The amount of energy obtainable from the above sources could easily cover all the current energy needs of the mankind. A number of researchers believe that rendering green energy cheaper than traditional energy is unrealistic in the next 15 years. One of the reasons is a high cost related to the localization of generating facilities, requiring creation of supporting industrial base driving the investments up. Another problem with implementing a green energy is related to potential significant losses to the providers of conventional utility services. In this connection, it is crucial to harmonize ecological and economic aspects of the green energy, as well as choose an optimal energy supply model. Traditional energy sources keep playing a dominant role in the world energy balance as well as in individual countries. Fossil fuels have the advantage of the established transportation routes as well as offer significant benefits. However, as available resources begin to run out, the cost of their production increases. On the other hand, the cost of alternative energy sources is falling due to large-scale investments in innovative technologies. According to the calculations of the U.S. Energy Information Administration (EIA), in 2020, 40% of energy in the country was obtained from non-fossil fuel sources. In Europe, the production of solar electricity in 2020 increased by 60% compared to 2019.

Economic benefits from implementing alternative energy sources include creation of new jobs, stabilizing energy cost by reducing dependance on currency fluctuations and supply chain disruptions through increasing localization, however due to the limited-service life of the equipment new challenges arise, mainly related to high cost of recycling as well as ecological impact at the expense of the future generations. On the other hand, to the main disadvantages of fossil fuels belong constantly depleting deposits, releasing of greenhouse gas emissions including carbon monoxide, soil and water pollution, oil spills, etc. The following trends have emerged as possible solutions: gradual transition

to a post-industrial society based on the development and widespread of information technologies, improving standards of education and culture.

The peculiarity of the Fourth Industrial Revolution 4.0 [8, pp. 5-14; 11, pp. 8-22; 12; 13; 14 etc.], unlike the first three, is a major shift into focus of the environmental problems and alternative energy sources.

Below is the list of the most common and rapidly developing types of green energy:

1. *Hydropower* is the most common type of a green energy, with approximately 54% of all generating capacity in the world and China as a world's leader of hydroelectric power production. The main source is the potential of a water flow.

2. *Wind energy* ranks second in terms of production scale. Technological advances and the use of new composite materials have contributed to increasing the service life and reducing the cost of wind turbines. One of the advantages of the wind energy is that it can be effectively used in sparsely populated areas by installing windmills parks. It is important to note that windmills require practically no ordinary fuel for their operations. According to a study by the Massachusetts Institute of Technology, in case of a full scale transition to a wind energy, half of the entire territory of Great Britain will have to be used for the installation of wind turbines. According to Bill Gates, one of the ways to deal with this problem is increase the capacity of batteries by a factor of twenty. Unfortunately, he notes, it is highly likely that this is not possible.

3. *Solar energy* is the fastest-growing type of green energy and the third largest in the world in terms of RES-based production in 2021. The solar energy is at its peak of efficiency in the equatorial countries. The largest solar power plant is located in the United Arab Emirates and produces enough electricity to reduce the carbon footprint equivalent to eliminating 200,000 cars.

4. *Bioenergy* is the fourth largest type of green energy. The production of electricity and heat is based on the innovative use of traditional biomass sources, such as agricultural by-products and household waste. In this case, energy, both electrical and thermal, is produced from organic fuel. Biofuels of the second generation include products obtained by pyrolysis, i.e., rapid conversion of mass into liquid. China, Great Britain, and India are leaders in bioenergy production. Brazil, Germany, the USA, and Sweden are also actively developing these technologies.

5. *Geothermal energy* is a rapidly developing type of renewable energy source. A geothermal plant produces electrical energy from the thermal energy of underground sources (for example, geysers). The largest producer of geothermal electricity in the world is Iceland. Prominent positions in this area are occupied by Indonesia, Italy, Mexico, the Philippines, and the USA.

In our study, we emphasize the impact that several consecutive systemic worldwide crises have on the economy in general and the energy sector in particular. Modern energy sector is at a crossroads, urgently requiring serious qualitative shifts in approach to existing problems. The importance to study and understand these problems and their role in the global economy have been repeatedly discussed at various conferences, summits, and forums.

The world's most powerful energy accumulation and storage systems based on lithium-ion batteries are being created in California, USA. The Gateway Energy Storage facility with capacity of 250 MW, and the Moss Landing facility, will have a significant

capacity to store and send energy to the grid with maximum capacity for four hours during periods of high demand [13-15]. Another problem is the possible shortage of various metals and materials necessary for the development of renewable energy.

The global transformation of energy systems will be carried out along 4 axis: *energy efficiency, decarbonization, digitalization, decentralization*. Energy transition is aimed at solving the climate problem by abandoning coal, oil, natural gas and expanding the use of green energy sources. Analysis of forecasts supporting energy transition shows that the most important condition for achieving these goals is the preservation of energy inequality between the developed and the developing world. The countries of Central and Eastern Europe (CEE), due to their substantial socio-economic differentiation, show significant differences in the scale and structure of energy supply. The development of green energy sector in the region is actively supported by state programs. The aim of this article was not to describe and consider all existing aspects and problems of the energy transition but to focus on the question if energy transition can be achieved at all and to which extent.

There are currently wide debates dedicated to the future of thermonuclear energy. Despite significantly higher efficiency of nuclear power plants compared to conventional energy sources, numerous challenges arise from the differences in nuclear power generation strategies of different countries.

### **Conclusions**

The transition to innovative, and sustainable energy means a transition to a fundamentally different energy system in order to address a number of various challenges and factors. The timing of the energy transition will have to be realistically assessed. Despite the significant progress in the field of new technologies and increasing energy efficiency, the full realization of the energy transition by 2050 is highly unlikely. The transition to green energy is being actively lobbied by the European Union and the United States. At the same time, 85% of the world's energy balance and 75% in EU countries are still accounted for by hydrocarbons. And for one billion people on earth, firewood remains the main source of heat and fuel for cooking. The current trend is still dominated by electricity produced from fossil fuels preventing the “green energy wave” from completely replacing oil and gas producers with solar farm and windmills as a reliable base of a large-scale energy transformation in the coming years.

Despite the foregoing, the discussion of issues related to alternative energy sources, research and development, is still of great interest around the world. Therefore, research in this direction needs to be continued.

### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Бекулова С.Р. Возобновляемые источники энергии в условиях новой промышленной революции: мировой и отечественный опыт. *Мир новой экономики*. 2019. № 13(4). С. 14-21.
2. Виноградов И., Волобуев А. Китай поставил рекорд по вводу ветровых электростанций // *Ведомости*. 2021.
3. Дегтярёв К.С., Залиханов А.М., Соловьёв А.А., Соловьёв Д.А. К вопросу об экономике возобновляемых источников энергии. *Энергия: экономика, техника, экология*. 2016. № 10. С. 10-20.

4. Дятел Т. Европейская энергетика озеленилась. Коммерсантъ. 2021. № 12.
5. Кошарская Л.В., Бреднёва В.П. О проблемах и инвестиционных технологиях преодоления кризисной ситуации в отечественном судоремонте. Міжнар. наук.-практ. конф. «Антикризове управління розвитком морської галузі України». 2019. Батумі. С. 16-17.
6. Мастепанов А.М. Большие циклы и “черные лебеди». Energy policy. 2020. № 6. Р. 4-19.
7. Мастепанов А.М. Основные движущие силы энергетического перехода и проблемы его достижения. 2021. № 8(2). С. 256-276.
8. Шваб К. Технологии Четвертой промышленной революции. Пер. с англ. М.: Эксмо, 2018. С. 320.
9. Pakulska T. Green energy in Central and Eastern European (CEE) countries: new challenges on the path to sustainable development. Energies. 2021. № 14(4).
10. Pichai G. A basic difference between traditional and green energy sources. About Smart Cities. Cities, Events, Journal. 2018.

#### REFERENCES

1. Bekulova C.R. (2019). Renewable energy sources in the context of the new industrial revolution: world and domestic experience [Vozobnovlyаемыe istochniki energiyi v usloviyah novoy promishlenoyi revolyutsiyi: mirovoy I otechestvennyy opit]. The world of the new economy. № 13(4). pp. 14-21 [In Russian].
2. Vinogradov I., Volobuev A. (2021). China set a record for the commissioning of wind power plants [Kitayi postavil record po vvodu vetrovih elektrostantsiyi] // Vedomosti. [In Russian].
3. Degtyarev K.S., Zalikhanov A.M., Solovyov A.A., Solovyov D.A. (2016). On the question of the economics of renewable energy sources [K voprosu ob ekonomike vozobnovlyamih istochnikov energiyi]. Energy: economics, technology, ecology №10. pp. 10-20 [In Russian].
4. Dyatel T. (2021). The European energy sector is greening [Evropeyskaya energetika ozelenilas]. Kommersant. № 12 [In Russian].
5. Kosharskaya L.V., Brednyova V.P. (2019). On the problems and investment technologies for overcoming the crisis in the domestic ship repair [O problemah I investitsionnih tehnologiyah preodoleniya krisisnoyisituatsiyi v otechestvennom sudoremonte]. International scientific-practical. conf. “Anti-crisis management of the development of the maritime industry in Ukraine”. pp. 16-17 [In Russian].
6. Mastepanov A.M. (2020). Big cycles and “black swans” [Bolshiye tsikli I chorniyi lebedy]. Energy policy. № 6. pp. 4-19. [In Russian].
7. Mastepanov A.M. (2021). The main driving forces of the energy transition and the challenges of achieving it [Osnovniye dvizhuschiye sili energeticheskogo perehoda I problem ego dostizheniya]. № 8(2). pp. 256-276 (In Russian).

8. Schwab K. (2018). Technologies of the Fourth industrial revolution [Tehnologiyi Chetvertoy promishlennoyi revolutsiyi]. Transl. from Eng. Moscow: Eksmo; pp. 320. [In Russian].
9. Pakulska T. (2021). Green energy in Central and Eastern European (CEE) countries: new challenges on the path to sustainable development. Energies. № 14(4).
10. Pichai G. A (2018). basic difference between traditional and green energy sources. About Smart Cities. Cities, Events, Journal.

## РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.54:629.067

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.02>

### ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ЗМЕНШЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ ВІД СУДНОПЛАВСТВА

**А.І. Головань<sup>1</sup>, І.П. Гончарук<sup>2</sup>, А.О. Волошин<sup>3</sup>,  
О.М. Шумило<sup>4</sup>, Ю.О. Никифоров<sup>5</sup>, О.В. Шапов<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>к.т.н., доцент кафедри судноводіння і морської безпеки,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0001-6589-4381

<sup>2</sup>к.т.н., доцент кафедри судноводіння і морської безпеки,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-5306-4206

<sup>3</sup>к.т.н., професор, завідувач кафедри судноводіння і морської безпеки,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0003-3993-5826

<sup>4</sup>к.т.н., професор, проректор з навчально-педагогічної роботи,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0003-0574-1951

<sup>5</sup>к.т.н., професор, завідувач кафедри технічного обслуговування і ремонту суден,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-8901-6935

<sup>6</sup>к. т. н., директор Навчально-наукового інституту морського флоту,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-1913-379X

#### **Анотація**

*У статті розглядаються сучасні проблеми запобігання забруднення повітря в процесі експлуатації судна. Вказані проблеми зумовлені тим, що викиди вуглекислого газу сприяють глобальному потеплінню, а гази оксидів сірки і оксидів азоту швидко перетворюються на кислотні речовини, які впливають на хімічний склад морських, поверхневих вод та ґрунту, що має наслідки для організмів, які населяють підкислену воду. Всі фізіологічні і ферментативні процеси є чутливими до водневого показнику і, отже, можуть мати великий вплив, наприклад, на ріст мікроорганізмів, а також на більших тварин, наприклад, впливаючи на відчуття і органи нюху живих організмів. В теперішній час національні та міжнародні екологічні норми визначають необхідність покращення стану навколишнього середовища. Проведений аналіз попередніх досліджень і публікацій свідчить про те, що питанням визначення оптимального способу запобігання забруднення повітря в процесі експлуатації судна не приділено належної уваги. З огляду на прогнозування очікування збільшення глобальних морських перевезень приблизно на 3 % на рік з*

2021 по 2030 рік через економічне зростання та сприяння морському транспорту, цей прогноз формує необхідність аналізу та застосування дієвих засобів запобігання забруднення повітря. **Метою** статті є аналіз динаміки забруднення повітря від судноплавства і визначенні оптимального способу запобігання забруднення повітря в процесі експлуатації судна. А також аналіз нормативно правової бази, що регулює питання запобігання забруднення повітря і аналіз існуючих способів запобігання забруднення повітря в процесі експлуатації судна. **Результати.** Запропоновані заходи та надані рекомендації щодо вибору оптимального способу запобігання забруднення повітря в процесі експлуатації судна. **Висновки.** Таким чином, проблеми запобігання забруднення повітря в процесі експлуатації судна повинні вирішуватися в комплексі, з урахуванням того, що найефективнішими, менш витратними, такими, що не потребують значної модернізації самого судна, є наступні способи запобігання забруднення повітря: очищення відпрацьованих газів, їх рециркуляція, попередня обробка палива і застосування емульсій води та палива.

**Ключові слова:** запобігання, забруднення, атмосфера, судноплавство, судно, експлуатація, МАРПОЛ, ІМО.

#### RESEARCH OF WAYS TO REDUCE AIR POLLUTION FROM SHIPPING

A.I. Golovan<sup>1</sup>, I.P. Honcharuk<sup>2</sup>, A.O. Voloshyn<sup>3</sup>,  
O.M. Shumylo<sup>4</sup>, Yu.O. Nykyforov<sup>5</sup>, O.V. Shamov<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Ph.D (Engineering), Associate Professor of Navigation and Maritime Safety Department,  
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0001-6589-4381

<sup>2</sup>Ph.D (Engineering), Associate Professor of Navigation and Maritime Safety Department,  
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-5306-4206

<sup>3</sup>Ph.D (Engineering), Professor, Head of Navigation and Maritime Safety Department,  
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0003-3993-5826

<sup>4</sup>PhD (Engineering), Professor, Vice-rector for Educational and Pedagogical Work,  
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0003-0574-1951

<sup>5</sup>Ph.D (Engineering), Professor, Head of Maintenance and Repair of Vessels Department,  
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-8901-6935

<sup>6</sup>Ph.D (Engineering), Head of Maritime Training and Research Institute,  
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-1913-379X

#### Summary

The article considers modern problems of air pollution prevention during ship operation. These problems are caused by the fact that carbon dioxide emissions contribute to global warming, and sulphur oxide and nitrogen oxide gases are rapidly transformed into acidic substances that affect the chemical composition of sea, surface water and soil, which has consequences for organisms inhabiting acidified water. All physiological and enzymatic processes are sensitive to the hydrogen index and can therefore have a

major impact, for example on the growth of microorganisms, but also on larger animals, for example by affecting the senses and olfactory organs of living organisms. Currently, national and international environmental regulations define the need to improve the state of the environment. The analysis of previous studies and publications shows that the issues of determining the optimal way to prevent air pollution during ship operation have not been given due attention. Taking into account the forecasted expectation of an increase in global maritime traffic by about 3 % per year from 2021 to 2030 due to economic growth and the promotion of maritime transport, this forecast creates the need to analyze and apply effective means of preventing air pollution. The **purpose** of the article is to analyze the dynamics of air pollution from shipping and determine the best way to prevent air pollution during ship operation. As well as analysis of the regulatory framework governing the prevention of air pollution and analysis of existing ways to prevent air pollution during ship operation. **Results.** Measures are proposed and recommendations are given for choosing the best way to prevent air pollution during ship operation. **Conclusions.** Thus, the problems of preventing air pollution during ship operation should be solved in a complex, considering the fact that the most effective, less costly, such that do not require significant modernization of the ship itself, are the following ways to prevent air pollution: exhaust gas purification, recycling, fuel pretreatment and the use of water-fuel emulsions.

**Key words:** prevention, pollution, atmosphere, shipping, ship, operation, MARPOL, IMO.

**Вступ.** Судноплавство має довгу історію вагомого внеску в торгівлю та економічне зростання в усьому світі, і в 2021 році на нього припадало 80 % перевезень від загального об'єму світової торгівлі (UNCTAD 2021). Очікується, що глобальні морські перевезення будуть збільшуватися приблизно на 3 % на рік з 2021 по 2030 рік через економічне зростання та сприяння морському транспорту для пом'якшення кліматичних змін (ICS, 2021). Судноплавство також є джерелом забруднення, на яке припадає 15 % загальних викидів  $\text{NO}_x$  (оксидів азоту), 13 %  $\text{SO}_x$  (оксидів сірки) і 3 %  $\text{CO}_2$  (вуглекислого газу) у всьому світі (Smith et al., 2015). Викиди  $\text{CO}_2$  сприяють глобальному потеплінню, а гази  $\text{SO}_x$  і  $\text{NO}_x$  швидко перетворюються на кислотні речовини, які впливають на хімічний склад ґрунту та поверхневих вод, що має наслідки для організмів, які населяють підкислену воду (Jägerbrand et al., 2019).

**Постановка проблеми.** Викиди вуглекислого газу сприяють глобальному потеплінню, а гази оксидів сірки і оксидів азоту швидко перетворюються на кислотні речовини, які впливають на хімічний склад морських, поверхневих вод та ґрунту, що має наслідки для організмів, які населяють підкислену воду. Наприклад, багато фізіологічних і ферментативних процесів є чутливими до водневого показнику і, отже, можуть мати великий вплив, наприклад, на ріст мікроорганізмів, а також на більших тварин, наприклад, впливаючи на відчуття і органи нюху живих організмів. В теперішній час національні та міжнародні екологічні норми визначають необхідність покращення стану навколишнього середовища, а переваги від скорочення викидів від судноплавства були розраховані провідним науковцями морської галузі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В даний час питанням дослідження запобігання забруднення повітря в процесі експлуатації судна присвячено цілий

ряд публікацій [1, 2, 3, 4]. Аналіз цих публікацій свідчить про те, що питанням визначення оптимального способу запобігання забруднення повітря в процесі експлуатації судна не приділено належної уваги. З огляду на прогнозування очікування збільшення глобальних морських перевезень приблизно на 3 % на рік з 2021 по 2030 рік через економічне зростання та сприяння морському транспорту, цей прогноз формує необхідність аналізу та застосування дієвих засобів запобігання забруднення повітря.

**Формулювання цілей статті.** Метою статті є аналіз динаміки забруднення повітря від судноплавства і визначенні оптимального способу запобігання забруднення повітря в процесі експлуатації судна, для подальших досліджень і розробки відповідних заходів щодо зниження шкідливих викидів в атмосферне повітря від судноплавства.

**Виклад основного матеріалу.** Неможливо переоцінити роль океану як важливого критерія стабілізації клімату та підтримки життя та благополуччя людей, а також як ресурсу, який необхідно захищати та підтримувати. Проте, різні оцінки стану Світового океану показують, що біологічні ресурси прибережних морських районів продовжують деградувати [5], а з урахуванням очікуваного збільшення людства до 2050 року до 9,7 мільярда людей [6], негативний вплив на морське середовище значно зросте.

В контексті сталого розвитку морського транспорту, на додаток до заходів щодо мінімізації забруднення океанів від берегових джерел, особливі дії вживаються і щодо скорочення забруднення з суден, захисту атмосферного повітря шляхом впровадження нових лімітів на викиди сірки, управління баластними водами; контролю за перевезенням небезпечних та шкідливих речовин; збереження прибережних та морських районів, у тому числі за межами дії національної юрисдикції [7].

Морські судна є суттєвим чинником забруднення атмосфери. Уздовж основних судноплавних шляхів густі хмари вихлопних газів тягнуться на сотні кілометрів, їх чітко видно з літаків та супутників [8]. Вихлопні гази суден містять:

- вуглекислий газ,
- оксиди азоту,
- оксиди сірки,
- дрібнодисперсний пил і летючі органічні сполуки.

Причини з яких морські судна є суттєвими забруднювачами атмосфери, полягають у наступному (рис. 1).

По-перше, це пов'язано з тим, що судові двигуни дуже потужні і споживають величезну кількість палива.

По-друге, це паливо – мазут, дешеве пальне з високим вмістом сірки, що є, по суті, відходами нафтопереробки.

По-третє, морські судна, на відміну від автомобілів або електростанцій, не в достатній мірі обладнані системами очищення вихлопних газів, оскільки цій проблемі до певного часу не приділялося належної уваги.

Оксиди азоту та двоокис сірки концентруються, насамперед, у безпосередній близькості від джерел викидів і накопичуються вздовж судноплавних маршрутів (рис. 2). Тобто їх вплив на навколишнє середовище має суттєво виражений локальний характер.

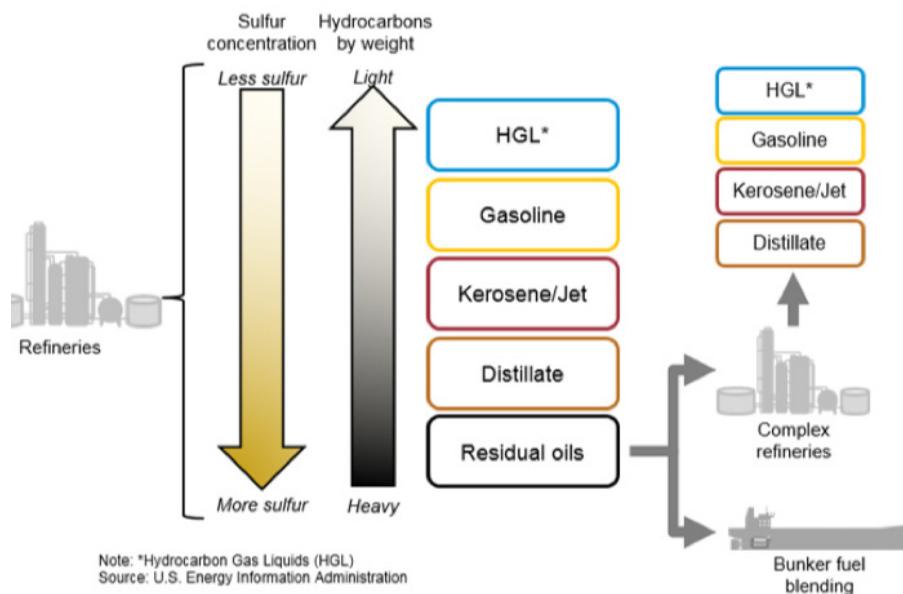


Рис. 1. Причини забруднення атмосфери суднами

А ось дрібнодисперсний пил поводиться інакше. «По всій прибережній смузі шириною до трьохсот кілометрів головним фактором негативного впливу суднових вихлопів на навколишнє середовище є саме тверді частинки. Вони забруднюють атмосферу на набагато більших територіях, ніж усі інші інгредієнти» [9].

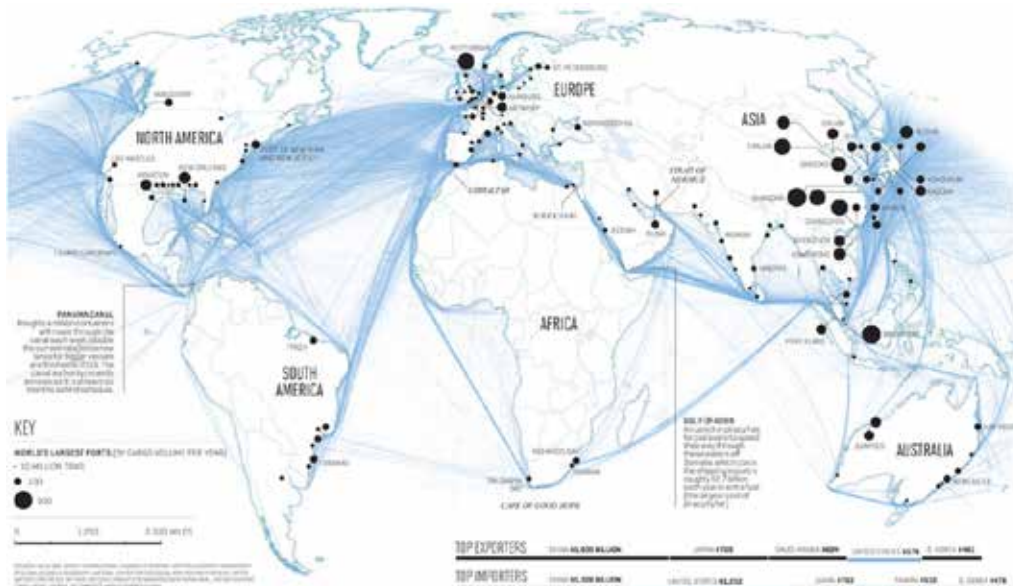


Рис. 2. Підвищена концентрація оксидів азоту та двоокису сірки вздовж судноплавних маршрутів

З 1 січня 2020 року Міжнародна морська організація заборонила використання палива з високим вмістом сірки.

Згідно з новими нормативами суднам заборонено спалювати будь-яке морське паливо із вмістом сірки понад 0,5 % без додаткового очищення вихлопних газів [10]. Міжнародна нормативно правова база, що регулює питання запобігання забруднення повітря з суден:

- Міжнародна конвенція про запобігання забрудненню з суден (MARPOL);
- Поправки до Додатку VI MARPOL (резолюція МЕРС.203(62) – Енерго-ефективність;
- Поправки до Додатку VI MARPOL (резолюція МЕРС.278(70)) – Система збору даних щодо споживання мазуту суднами;
- Керівні принципи щодо розробки плану управління енергоефективністю суден (SEEMP) на 2022 рік ( резолюція МЕРС.346(78));
- Керівні принципи 2022 щодо адміністративної перевірки даних про споживання суднового мазуту та експлуатаційної інтенсивності вуглецю ( резолюція МЕРС.348(78));
- Керівні принципи 2022 року щодо розробки та управління базою даних ІМО про споживання мазуту ( резолюція МЕРС.349(78));
- Циркуляр МЕРС щодо подання даних до системи збору даних ІМО про споживання палива суднами з держави, яка не є учасником Додатку VI MARPOL (МЕРС.1/Circ.871/Rev.1);
- Зразок формату для підтвердження відповідності згідно з правилом 5.4.5 Додатку VI MARPOL ( МЕРС.1/Circ.876).

Відомо чотири основні способи відповідати новим нормативам та знизити викиди оксидів сірки в атмосферу (рис. 3):

1. Перехід на паливо з низьким вмістом сірки. Цей перехід не вимагатиме від судновласників великих грошових вкладень і займе лише кілька днів – на заміну масла та регулювання двигуна для роботи на паливі з низьким вмістом сірки.

2. Перехід на альтернативне паливо з низьким вмістом сірки, наприклад, скраплений природний газ (СПГ). Скраплений природний газ – це вид палива, яке не містить сірки. Судна на СПГ скорочують викиди оксидів азоту на дев'яносто відсотків, а оксидів сірки майже на сто відсотків.

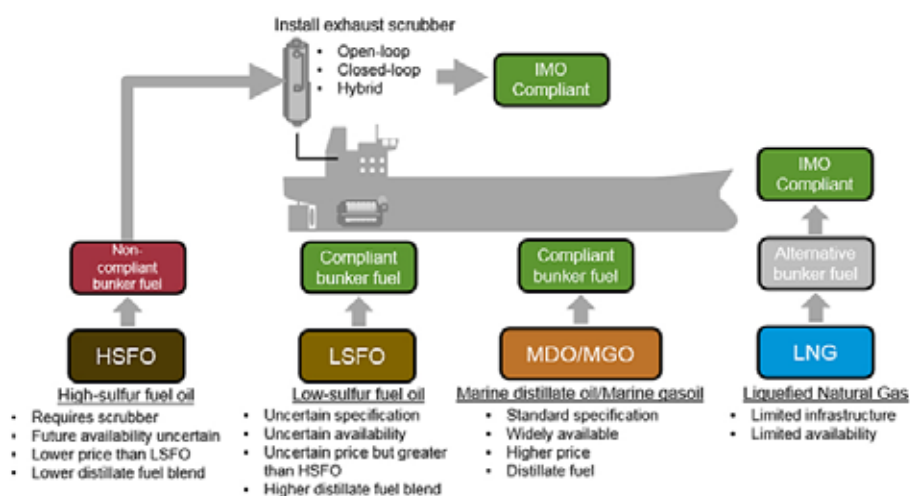


Рис. 3. Способи зниження викидів оксидів сірки та дрібнодисперсного пилу

3. Установка систем очищення вихлопних газів, також відомих як скрубери. Скрубери призначені для видалення оксидів сірки із вихлопних газів суднового двигуна, генератора або котла.

4. Зниження швидкості ходу. За даними незалежного дослідницького центру Delft, при зниженні швидкості суден на тридцять відсотків обсяг викидів у період із 2021 по 2030 роки скоротиться на дві з половиною гігатонни.

В свою чергу, способи зниження викидів вуглекислого газу поділено на конструктивні та експлуатаційні. До конструктивних відносяться:

- Використання нових конструкційних матеріалів
- Використання енергії сонця
- Використання енергії вітру
- Оптимізація обводів корпусу
- Використання нових суднових покриттів
- Система повітряного змащення підводної частини корпусу
- Застосування гібридної енергетичної установки
- Удосконалення головного двигуна
- Удосконалення допоміжних систем
- Застосування систем утилізації теплоти

До експлуатаційних відносяться:

• Планування маршруту судна з урахуванням часу, витрати палива та гідрометеорологічних умов

- Підвищення ефективності використання пропульсивної системи
- Удосконалення використання суднового вантажного простору
- Оптимізація диференту і осадки судна
- Зниження швидкості

До найбільш дієвих експлуатаційних відносяться:

• Планування маршруту судна з урахуванням часу, витрати палива та гідрометеорологічних умов

- Підвищення ефективності використання пропульсивної системи
- Зниження швидкості

А також, способи зниження викидів оксидів азоту поділяються на конструктивні та експлуатаційні. До конструктивних відносяться:

- Підвищення тиску впорскування палива
- Оптимізація форми камери згоряння для отримання максимально однорідної суміші

• Застосування рециркуляції (перепуску) частини відпрацьованих газів через охолоджувач у впускний трубопровід

- Використання емульсії води і палива
- Застосування нейтралізаторів для очищення вихлопних газів
- Переведення роботи двигуна на природний газ

До експлуатаційних відносяться:

- Обмеження використання основних двигунів
- Застосування багатофункціональних присадок до палива
- Попередня обробка палива
- Зниження максимальної температури циклу

- Оптимізація кута випередження упорскування палива
  - Зміна параметрів надувного повітря
- До найбільш дієвих експлуатаційних відносяться:
- Обмеження використання основних двигунів
  - Застосування багатофункціональних присадок до палива
  - Попередня обробка палива

**Висновки.** Таким чином, проблеми запобігання забруднення повітря в процесі експлуатації судна повинні вирішуватися в комплексі, з урахуванням того, що найефективнішими, менш витратними, такими, що не потребують значної модернізації самого судна, є наступні способи запобігання забруднення повітря: очищення відпрацьованих газів, їх рециркуляція, попередня обробка палива і застосування емульсій води та палива. З організаційних заходів, застосовується зниження швидкості ходу і вводиться обмеження використання основних двигунів в акваторіях портів. Судно, як правило, буксирується до причалу та виводиться на зовнішній рейд за допомогою буксирів.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Gang Wang et al. Ozone pollution in the plate and logistics capital of China: Insight into the formation, source apportionment, and regional transport, *Environmental Pollution*, Volume 313, 2022, 120144, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120144>.
2. Silveira RS, Corrêa SM, de M Neto N. Possible influence of shipping emissions on metals in size-segregated particulate matter in Guanabara Bay (Rio de Janeiro, Brazil). *Environ Monit Assess*. 2022 Sep 26;194(11):828. doi: 10.1007/s10661-022-10517-7. PMID: 36156154; PMCID: PMC9510154.
3. Anindita Mandal et al. A detailed perspective of marine emissions and their environmental impact in a representative Indian port, *Atmospheric Pollution Research*, Volume 12, Issue 10, 2021, 101194, ISSN 1309-1042, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101194>.
4. Herdzik, J. Decarbonization of Marine Fuels — The Future of Shipping. *Energies* 2021, 14, 4311. <https://doi.org/10.3390/en14144311>
5. Emissions Gap Report. 2018 // UN Environment. Emissions Gap Report. URL: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2018>
6. The UNCTAD Handbook of Statistics. Geneva, 2019. URL: <https://unctad.org/webflyer/handbook-statistics-2019>
7. Golovan A et al. 2020 Aspects of remote monitoring of the transport vessel under operating conditions. *ICTE in Transportation and Logistics 2019* pp 295-301 [https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_37)
8. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction, 2015-2030. URL: <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>
9. Golovan A, Rudenko S, Gritsuk I and Shakhov A 2018 Improving the process of vehicle units diagnosis by applying harmonic analysis to the processing of discrete signals SAE Technical Paper 2018-01-1774 <https://doi.org/10.4271/2018-01-1774>

10. Golovan A et al. 2020 Features of mathematical modeling in the problems of determining the power of a turbocharged engine according to the characteristics of the turbocharger SAE Int. J. Engines 13(1) 5-16 <https://doi.org/10.4271/03-13-01-0001>

#### REFERENCES

1. Wang, G., Zhu, Z., Liu, Z., Liu, X., Kong, F., Nie, L., Gao, W., Zhao, N., & Lang, J. (2022). Ozone pollution in the plate and logistics capital of China: Insight into the formation, source apportionment, and regional transport. *Environmental Pollution*, 313, 120144. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120144>
2. Silveira, R. S., Corrêa, S. M., & de M. Neto, N. (2022). Possible influence of shipping emissions on metals in size-segregated particulate matter in Guanabara Bay (Rio de Janeiro, Brazil). *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(11). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10517-7>
3. Mandal, A., Biswas, J., Farooqui, Z., & Roychowdhury, S. (2021). A detailed perspective of marine emissions and their environmental impact in a representative Indian port. *Atmospheric Pollution Research*, 12(10), 101194. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101194>
4. Herdzik, J. (2021). Decarbonization of Marine Fuels—The Future of Shipping. *Energies*, 14(14), 4311. <https://doi.org/10.3390/en14144311>
5. Emissions Gap Report 2018. (2018). UNEP – UN Environment Programme. <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2018>
6. Handbook of Statistics 2019. (2019, December 10). UNCTAD. <https://unctad.org/webflyer/handbook-statistics-2019>
7. Golovan, A., Gritsuk, I., Kurtsev, M., Ischuka, O., & Vrublevskyi, R. (2020). Aspects of Remote Monitoring of the Transport Vessel Under Operating Conditions. *ICTE in Transportation and Logistics 2019*, 295–301. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_37)
8. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030. (2015). UNDRR. <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>
9. Golovan, A., Rudenko, S., Gritsuk, I., Shakhov, A., Vychuzhanin, V., Mateichyk, V., Kononova, O., Kuric, I., Saga, M., & Zenkin E.Y., E. (2018). Improving the Process of Vehicle Units Diagnosis by Applying Harmonic Analysis to the Processing of Discrete Signals. *SAE Technical Paper Series*. <https://doi.org/10.4271/2018-01-1774>
10. Golovan, A., Gritsuk, I., Popeliuk, V., Sherstyuk, O., Honcharuk, I., Symonenko, R., Saravas, V., Volodarets, M., Ahieiev, M., Pohorletskyi, D., & Khudiakov, I. (2019). Features of Mathematical Modeling in the Problems of Determining the Power of a Turbocharged Engine According to the Characteristics of the Turbocharger. *SAE International Journal of Engines*, 13(1). <https://doi.org/10.4271/03-13-01-0001>

## АНАЛІЗ АВТОНОМНИХ НАДВОДНИХ СУДЕН ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ГІДРОГРАФІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

**Б.О. Єрмоленко**

аспірант кафедри «Програмованої електроніки електротехніки та телекомунікацій»,  
Національний університет кораблебудування імені Адмірала Макарова, Миколаїв, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-0353-891X

### **Анотація**

**Вступ.** У наш час питання автоматизації багатьох процесів набуває широкого поширення. Роботизовані системи з дистанційним керуванням є важливою віхою розвитку цього напрямку. Використання дронів та роботів у різних сферах діяльності пов'язане перш за все з великим попитом на такі апарати, тому багато досліджень відбуваються з застосуванням подібних систем. Гідрографія не стала виключенням, де застосування автономних апаратів є актуальним питанням. **Мета** статті полягає у проведенні огляду та аналізу автономних надводних суден, історично важливих етапів їх створення та виявити основні особливості їх конструкції. Дослідити застосування АНС у галузі гідрографічних досліджень для вирішення задач моніторингу. **Результати.** Розглянуті і аналізовані поняття Автономних надводних суден, основні етапи їх створення та використання АНС у гідрографічних дослідженнях. **Висновки.** У результаті проведеного дослідження Автономних надводних суден, розглянуто ряд питань: ключові етапи розробки АНС, проаналізовано головні характеристики конструкції та досліджено питання актуальності використання АНС у гідрографічних дослідженнях. Розвиток цієї галузі призвів до наявності різних варіацій корпусів, різноманітності корисного навантаження, що дозволяє використовувати АНС у різних дослідницьких місцях. Галузь гідрографії є однією з основних, у якій активно застосовуються АНС, це дає змогу проводити дослідження морів, океанів та річок, при зменшенні фінансових витрат. Детальна зйомка рельєфу і точні гідрографічні дані, отримані від таких комплексів, впливають не тільки на гідрографію, а й на всі галузі які пов'язані з водним середовищем. Подальші дослідження у цьому напрямі, дозволять змінити гідрографічні дослідження у новий, інноваційний бік.

**Ключові слова:** Автономні надводні судна, гідрографія, моніторинг, дистанційне керування, електродвигун, судно, навігація.

**ANALYSIS OF AUTONOMOUS SURFACE VEHICLES  
FOR SOLVING HYDROGRAPHIC MONITORING TASKS**

**B.O. Yermolenko**

Postgraduate Student at the Department of “Programmable Electronics,  
Electrical Engineering and Telecommunications”,  
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-0353-891X

**Summary**

**Introduction.** Nowadays, the issue of automation of many processes is becoming widespread. Robotic systems with remote control are an important milestone in the development of this direction. The use of drones and robots in various fields of activity is primarily associated with a high demand for such devices, so many studies are conducted using such systems. Hydrography was not an exception, where the use of autonomous devices is a topical issue. **Purpose** of the article is to review and analyze autonomous surface vehicles, the historically important stages of their creation, and to identify the main features of their design. Investigate the application of ASV in the field of hydrographic research to solve monitoring problems. **Results.** The concept of autonomous surface vessels, the main stages of their creation and the use of ASV in hydrographic research are considered and analysed. **Conclusions.** As a result of the study of autonomous surface vessels, a number of issues were considered: the key stages of the development of ASV, the main characteristics of structures were analyzed, and the question of the relevance of using ASV in hydrographic research was investigated. The development of this field has led to the presence of different variations of the hulls, a variety of payloads, which allows the use of ASV in various research missions. The field of hydrography is one of the main ones in which ASV is actively used, it makes it possible to conduct research of seas, oceans and rivers, while reducing financial costs. Detailed surveying of the terrain and accurate hydrographic data obtained from such complexes affect not only hydrography, but also all areas related to the water environment. Further research in this direction will allow changing hydrographic research in a new, innovative direction.

**Key words:** Autonomous surface vehicles, hydrography, monitoring, remote control, electric motor, ship, navigation.

**Вступ.** Тема автоматизації багатьох процесів набуває широкого поширення. Роботизовані системи з дистанційним керуванням є важливою віхою розвитку цього напрямку. Використання різного роду дронів та роботів у багатьох сферах діяльності пов'язане перш за все з великим попитом на такі апарати, тому велика кількість досліджень відбуваються з застосуванням подібних систем. Гідрографія не стала виключенням, де застосування подібних апаратів наразі є актуальним питанням.

Гідрографія характеризується як галузь науки, яка пов'язана з вимірюванням та описом фізичних елементів і процесів океанів, морів, річок, озер та берегових зон. Отриманні дані використовуються у навігаційних цілях та для підтримки всіх структур пов'язаних з морем. Для забезпечення безпеки та ефективності навігації

суден гідрографія також є основою будь-якої іншої діяльності пов'язаної з морем, а саме: експлуатація ресурсів, охорона та управління навколишнім середовищем, делімітація морського кордону, національні інфраструктури морських просторових даних, управління прибережною зоною, морська оборона та безпека, моделювання повеней і затоплення цунамі, морські науки [1].

**Постановка проблеми.** Зі стрімким розвитком техніки, новітні методи та засоби проведення досліджень приходять на заміну більш застарілим та дорогим інструментам. Питання як швидше і ефективніше виконувати певні задачі набуває актуальності у суспільстві. Роботизовані пристрої широко використовуються у різних сферах як виробництва так і науки. Одним із таких засобом є Автономне надводне судно.

**Аналіз останніх робіт і публікацій.** Автономні надводні комплекси можуть застосовуватись при вирішенні широкого спектру завдань у різних сферах, таких як інженерні роботи, дослідження портових зон, патрулювання водних акваторій, навігаційні роботи, військові цілі, екологічні та гідрографічні дослідження. Важлива особливість полягає у відсутності будь якого екіпажу на борту, а все управління відбувається автоматично або дистанційно. Вони можуть бути оснащені різними видами корисного навантаження, такими як гідролокатор (бічного сканування), камери та багатопроменеві ехолоти. Три важливі переваги формують попит на судна без екіпажу: нижчі витрати на використання, більша витривалість і зниження ризику для життя людей.

**Формулювання цілей статті.** Мета статті полягає у здійсненні огляду та аналізу автономних надводних суден, історично важливих етапів їх створення, виявити основні особливості їх конструкції. Дослідити застосування АНС у галузі гідрографічних досліджень для вирішення задач моніторингу.

**Виклад основного матеріалу.** Автономний або безпілотний надводний апарат - це автоматизована система, яка рухається водною поверхнею без присутності екіпажу на борту. З появи перших дослідних зразків почався стрімкий розвиток цієї галузі та було розроблено багато рішень які відрізняються призначенням, розмірами корпусу та системами керування. Розвиток цієї галузі сягнув великих обертів, багато країн використовують автономні надводні судна для вирішення задач різного ступеню складності.

США активно проводили дослідження у цій сфері. Саме тому можна вважати що історія створення розробок починається з 1993 році коли було розроблено перше АНС, яке було виготовлене у Массачусетському Технологічному Інституті за програми Sea Grant, та мало назву Artemis (див. рис. 1). Це судно є копією рибальського траулера в масштабі 1/17, був обладнаний електродвигуном та рульовим управлінням з серводвигуном, для функцій навігації та контролю також встановили мікропроцесор і цифровий компас. Основна задача судна полягала в проведенні досліджень та тестуванні систем управління для подальшого розвитку АНС. Також було встановлено ехолот, що дало змогу виконувати батиметричне картографування на річці Чарльз у Кембриджі де і проходили тестування. Головна інновація полягала у розмірі цього комплексу. Із недоліків Artemis слід зауважити невелику швидкість руху, невелике корисне навантаження та неможливість рухатись у середовищах більших ніж невелика річка.



*Рис. 1. Автономне надводне судно Artemis*

Поява АНС Artemis стало великим кроком для розвитку і подальших досліджень у цій галузі. Напрацювання отримані під час його розробки дали змогу створити наступне автономне надводне судно ACES [2].

Також важливий приклад, це розроблений у 2004 році автономне надводне судно SCOUT (Surface Craft for Oceanographic and Undersea Testing) (див. рис. 2). Корпус у вигляді байдарки, який вироблений із поліетилену високої щільності, керування було реалізовано завдяки вбудованому бортовому комп'ютеру з системами Wi-Fi та радіо модемним зв'язком. Рух здійснювався з застосуванням електродвигуну та серводвигуну для зміни напрямку руху. Головна ідея – це створити відносно недорогої платформу для швидкого розгортання місії [3].



*Рис. 2. Автономне надводне судно SCOUT*

Слід зазначити, що у Європі науковці та дослідники також розробляли АНС. З 1998 року у Німеччині почався проект *Measuring Dolphin*. Було поставлено багато задач, зокрема тестовий зразок повинен був мати автоматичне керування, захист від впливу навколишнього середовища та навігаційні системи. Прототип був зроблений у вигляді катамарану зі скловолокна, це дало змогу підвищити корисне навантаження та зменшити вразливість від впливу навколишнього середовища. Для руху застосували гібридну систему живлення яка складається з акумуляторів та двигуна внутрішнього згорання для зарядки, також судно мало автопілот. Для отримання даних про рух було створена система на основі супутникового навігаційного передавача DGPS та встановлені гідроакустичні глибинні сенсори для виміру глибини [4].

Іншою важливою та цікавою розробкою можна вважати проект *ASIMOV* (*Advanced System Integration for Managing the coordinated operation of robotic Ocean Vehicles*). Започаткований Комісією Європейських Співтовариств та програмою *Mast III*. Головною ідеєю цього дослідницького проекту було поєднання Автономного надводного комплексу *DELFIN* (див. рис. 3) з Автономним підводним судном для збору та передачі даних. Таке поєднання забезпечувало швидкий зв'язок та передачу отриманих даних та команд від АНС до АПС, і подальшу передачу пункту управління який розміщується на іншому судні або березі. *DELFIN* також використовується як незалежний пристрій, який рухається в автономному режимі по заданій траєкторії [5].



*Рис. 3. Автономне надводне судно DELFIN*

У військовій галузі також проявляли інтерес до автономних надводних апаратів. Лабораторія протимінної оборони ВМС США створила у 1954 році проект протимінного катеру. До 1960 х років ВМС застосовувала катери-мішені на базі «авіаційно-рятувальних» човнів з дистанційним керуванням для проведення навчань зі стрільб. Надалі попит на протимінні безпілотики для застосування у інших небезпечних місцях продовжував зростати. Розробка та використання безпілотних надводних комплексів продовжується та розвивається протягом останніх років. Сьогодні ВМС США використовують ряд АНС такі як безпілотики – мішені, включаючи *Mobile Ship*

Target (MST), а також High Speed Maneuvering Seaborne Target (див. рис. 4) [6]. Наразі АНС широко використовуються також для охорони та патрулюванні портів та кордонів, розширювався асортимент АНС та спектр їх застосування для військових потреб, зробивши АНС універсальним засобом розвідки та отримання даних.



*Рис. 4. Військове АНС High Speed Maneuvering Seaborne Target*

Автономні надводні засоби невеликого розміру набирають популярності серед розробників та користувачів. Це новий етап розвитку АНС який насамперед пов'язаний з розвитком технологій в цілому. Відносно малі розміри корпусу(переважно до 1 м) у поєднанні з можливостями більших АНС дозволяє проводити дослідження у важкодоступних умовах та робить проведення дослідницьких місій більш ефективними. Серед таких рішень слід виділити Apache 4 (див. рис. 5) [7] та дослідницький комплекс I-Boat bs-3 [8], важливими перевагами яких є саме невелика розмірність та можливість виконувати поставлені задачі.



*Рис. 5. Автономне надводне судно Apache 4*

За останні роки автономні надводні комплекси пройшли довгий шлях розвитку та тестувань. Аналіз історії розробок автономних надводних суден демонструє особливості які притаманні всім АНС.

Існують безліч варіацій зовнішнього вигляду, та які відрізняються функціональними особливостями в залежності від їх призначення. Основні характеристики автономних надводних суден складаються з:

1. Корпус. Існують безліч варіантів корпусів які умовно можна розділити на такі групи: жорсткі надувні корпуси, каяки (однокорпусні), катамарани (подвійні корпуси) і тримарани (потрійні корпуси).

2. Енергетична система та система управління. Існують електродвигуни або двигуни внутрішнього згоряння. Управління здійснюється завдяки кермової установки. Існують варіанти коли управління відбувається завдяки декількох двигунів закріплених на корпусі.

3. Системи зв'язку. Системи дистанційного обміну інформацією зі станцією керування, та системи зв'язку в середині самого судна.

4. Системи GNC. Один із головних компонентів. Бортовий комп'ютер завдяки якого відбувається керування.

5. Обладнання для збору даних. До складу зазвичай входять навігаційні модулі, та периферійне обладнання: камери, гідролокатори, сонари. Встановлюється в залежності від цілей які будуть виконуватись [9].

Серед загальних переваг необхідно виділити такі:

- відносно невелика розмірність у порівнянні з звичайними суднами;
- можливість орієнтування у просторі завдяки системам навігації;
- більшість АНС мають автопілот та рухаються у автоматичному режимі;
- передача даних на пункт управління.

Дослідження демонструє ряд недоліків, які наразі є притаманні багатьом зразкам. Зокрема важливими питаннями які необхідно досліджувати є: час на розгортання дослідницької місії з застосуванням АНС; ціна розробки та побудови; та система автопілоту.

**Застосування у гідрографічних цілях.** Гідрографія та дослідження у цьому напрямі впливають на розвиток багатьох сфер. Дані які отримують під час проведення гідрографічних досліджень використовуються для оцінки стану екології, аналізу акваторій, складання карт для судноплавства та ін. Гідрографія як галузі тісно пов'язана з судноплавством. Важливість проведення аналізу водних ресурсів, таких як: океани, моря, річки, дає змогу прогнозувати зміни у ситуації і реагувати на них.

Під час гідрографічних досліджень ставляться різні задачі, зокрема: вимірювання припливів і відпливів, визначення глибини шляхом зондування, аналіз замулення, огляд підводної поверхні. Традиційними засобами для проведення гідрографічних досліджень використовуються судна, та складне обладнання таке як багатопроменеві ехолоти, однопроменеві ехолоти, сонари бічного сканування, системи отримання та обробки даних, все це робить дослідження вкрай фінансово витратним.

Представлені результати аналізу, демонструють що АНС з самого початку створення застосовувались саме у гідрографії, океанографії і є носіями різних сенсорів, датчиків, обладнання для проведення аналізу та дослідження інформації різного характеру. Тобто, можна вважати що поняття АНС та гідрографія пов'язані один з одним, і АНС виступає важливим інструментом для виконання задач гідрографічного моніторингу. Наразі АНС можуть вирішувати майже всі задачі з проведення гідрографічного моніторингу, групи АНС спрямовуються на

інтенсивні дослідження океанів у реальному часі. Впровадження АНС великої дальності дасть змогу зменшити витрати на дослідження [10].

Обладнання яке застосовується для отримання гідрографічних даних не займає такий великий об'єм і це дозволяє встановлювати його на платформах АНС. Автономний рух по заданому маршруту дає змогу більш ефективно виконувати поставлені завдання, а швидка передача сигналу дозволяє отримувати дані у реальному часі.

Дослідження у галузі автономних надводних суден продовжуються і надалі, все більше науковців і виробників роблять свій внесок. Розробляються різні конструкції корпусу які відповідають новітнім вимогам. Тенденції розвитку базуються на додаванні новітніх технологій у передачі даних, навігації та супутниковому зв'язку, додаванні сонячних панелей для покращення запасу ходу та зменшення впливу на навколишнє середовище.

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження автономних надводних суден, розглянуто ряд питань: ключові етапи розробки АНС, проаналізовано головні характеристики конструкцій та досліджено питання актуальності використання АНС у гідрографічних дослідженнях. Розвиток цієї галузі призвів до наявності різних варіацій корпусів, різноманітності корисного навантаження що дозволяє використовувати АНС у різних дослідницьких місіях. Галузь гідрографії є однією з основних у якій активно застосовуються АНС, це дає змогу проводити дослідження морів, океанів та річок, при зменшенні фінансових витрат. Детальна зйомка рельєфу і точні гідрографічні дані, отримані від таких комплексів, впливають не тільки на гідрографію, але й на всі інші галузі, які пов'язані з водним середовищем. Подальші дослідження у цьому напрямі, дадуть змогу змінити гідрографічні дослідження у якісно новий, інноваційний бік.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. International Hydrographic Organization URL: <https://iho.int/en/importance-of-hydrography>
2. Mahley J., Development of the autonomous surface craft "ACES". Massachusetts Institute of Technology, Department of Ocean Engineering Sea Grant College Program Cambridge, C. 827. doi:10.1109/OCEANS.1997.624102.
3. Curcio, Joseph & Leonard, John & Patrikalakis, Andrew. (2005). SCOUT – A Low Cost Autonomous Surface Platform for Research in Cooperative Autonomy. 1. C. 725-729. Vol. 1. doi: 10.1109/OCEANS.2005.1639838.
4. Majohr J., Buch T., Korte C., Navigation and Automatic Control of the Measuring Dolphin (Messin™), IFAC Proceedings Volumes, Volume 33, Issue 21, 2000, C. 399-404. doi:10.1016/S1474-6670(17)37107-0.
5. A. Pascoal et al., "Robotic ocean vehicles for marine science applications: the European ASIMOV project," OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Conference Proceedings , (2000), C. 409-415 vol.1. doi:10.1109/OCEANS.2000.881293.
6. Bertram V., Unmanned Surface Vehicles – A Survey. ENSIETA, 2 rue François Verny, Brest, France, C. 2-4.

7. Apache 4 USV Used For Hydrographic Survey Project. URL: <https://geo-matching.com/content/chcnv-apache-4-usv-used-for-hydrographic-survey-project>
8. iBoat BS3 USV. URL: <https://en.hi-target.com.cn/iboat-bs3-usv>
9. Zhixiang Liu, Youmin Zhang, Xiang Yu, Chi Yuan, Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges, Annual Reviews in Control, Volume 41, 2016, C. 71-93. doi: 10.1016/j.arcontrol.2016.04.018.
10. J. E. Manley, "Unmanned surface vehicles, 15 years of development," OCEANS 2008, 2008, C. 1-4. doi:10.1109/OCEANS.2008.5152052.

#### REFERENCES

1. International Hydrographic Organization URL: <https://iho.int/en/importance-of-hydrography> .
2. Mahley J., Development of the autonomous surface craft "ACES". Massachusetts Institute of Technology, Department of Ocean Engineering Sea Grant College Program Cambridge, pp. 827. doi:10.1109/OCEANS.1997.624102.
3. Curcio, Joseph & Leonard, John & Patrikalakis, Andrew. (2005). SCOUT – A Low Cost Autonomous Surface Platform for Research in Cooperative Autonomy. 1. pp. 725-729 Vol. 1. doi:10.1109/OCEANS.1997.624102.
4. Majohr J., Buch T., Korte C., Navigation and Automatic Control of the Measuring Dolphin (Messin™), IFAC Proceedings Volumes, Volume 33, Issue 21, 2000, pp. 399-404. doi:10.1016/S1474-6670(17)37107-0.
5. A. Pascoal et al., "Robotic ocean vehicles for marine science applications: the European ASIMOV project," OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37158), 2000, pp. 409-415 vol.1. doi:10.1109/OCEANS.2000.881293.
6. Bertram V., Unmanned Surface Vehicles – A Survey. ENSIETA, 2 rue François Verny, Brest, France, pp. 2-4.
7. Apache 4 USV Used For Hydrographic Survey Project. URL: <https://geo-matching.com/content/chcnv-apache-4-usv-used-for-hydrographic-survey-project>
8. iBoat BS3 USV. URL: <https://en.hi-target.com.cn/iboat-bs3-usv>
9. Zhixiang Liu, Youmin Zhang, Xiang Yu, Chi Yuan, Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges, Annual Reviews in Control, Volume 41, 2016, pp. 71-93. doi: 10.1016/j.arcontrol.2016.04.018.
10. J. E. Manley, "Unmanned surface vehicles, 15 years of development," OCEANS 2008, 2008, pp. 1-4. doi:10.1109/OCEANS.2008.5152052.

**APPROXIMATE ESTIMATION OF PROPULSION  
FOR HIGH-SPEED DISPLACEMENT VESSELS**

**O.O. Kanifolskyi<sup>1</sup>, V. Ruggiero<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Ph.D., Docent of Department “Ship Theory and Design named after prof. Vorobyev Yu.L.”,  
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,

<sup>2</sup>Ph.D., Researcher ING/IND 01, Dipartimento di Ingegneria,  
University of Messina, Messina, Italy

**Summary**

*The classification of the main ship modes of the movement, from the point of view of international documents and the principles of the classical theory of ship design, is described in this article. A comparison is made of the requirements for the term “high-speed vessel”, from the point of view of the SOLAS convention, and the provisions of the design theory regarding the speed mode of the vessel. Various methods for classifying the types of vessel movement are described, using relative speed and depending on the type of forces applied to the hull of a high-speed vessel. For further research, a transitional mode of motion was chosen, namely the first half of the range of relative velocities from  $F_v = 1$  to  $F_v = 2$ . A schematic description of the main components of the resistance of the environment to the movement of the ship is presented. An assumption is made about the quantitative composition of the types of water resistance for ships of the transitional mode of motion. When calculating the water resistance, the change in the area of the wetted surface of the vessel is taken into account when moving at a high relative speed. An analysis of various forms of ship hull contours for different speeds has been carried out. Based on the experience of shipbuilders, a drawing is proposed showing the effectiveness of using various forms of frames, depending on the relative speed. Using the method least squares, a formula was derived to estimate the residuary resistance of ships moving at a relative speed  $F_v = 1$ . The formula is based on a wealth of experience gained in various test tanks. A comparison of the test results of two yacht models with water resistance values obtained using several calculation schemes is proposed in this paper. The test results of the models of the two yachts were compared with the results of statistical calculations and with the results of calculations according to the scheme, using specific data from the experimental pool. The calculation of the power of the main engines of high-speed vessels was carried out, followed by a comparison of the calculated and real values. As an example, the calculation of the power of the main engines for several high-speed ferries was carried out.*

**Key words:** propulsion, transitional mode, resistance of water.

ПРИБЛИЗНА ОЦІНКА ХОДОВОСТІ ВИСОКОШВИДКІСНИХ  
ВОДОТОНАЖНИХ СУДЕН

О.О. Каніфольський<sup>1</sup>, В. Руджієро<sup>2</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доцент кафедри «Кафедра теорії і проектування корабля  
імені проф. Ю.Л. Воробйова»,

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,

<sup>2</sup>Ph.D., дослідник ING/IND 01, відділ інженерії,

Університет Мессіни, Мессіна, Італія

**Анотація**

У статті описано класифікацію основних режимів руху суден з погляду міжнародних документів та принципів класичної теорії проектування. Зроблене порівняння вимог до терміну «швидкісне судно», з точки зору міжнародної конвенції СОЛАС, і положень теорії проектування стосовно швидкісних режимів руху судна. Описані різні способи класифікації типів руху плавзасобів за відносною швидкістю та залежно від виду сил, прикладених до корпусу швидкохідного судна. Для подальшого дослідження обрано перехідний режим руху, а саме першу половину діапазону відносних швидкостей від  $F_{rv} = 1$  до  $F_{rv} = 2$ . Наведено схематичний опис основних складових опору середовища руху судна. Зроблено припущення про кількісний склад видів опору води для перехідного режиму руху. При розрахунках опору води врахована зміна площі змоченої поверхні судна, при русі з великою відносною швидкістю. Проведено аналіз різних форм обводів корпусу для різних швидкостей. На основі досвіду суднобудівників пропонується рисунок, що показує ефективність використання різних форм шпангоутів залежно від відносної швидкості. Методом найменших квадратів виведено формулу з метою оцінки залишкового опору суден, з відносною швидкістю  $F_{rv} = 1$ . Формула заснована на багатому досвіді, отриманому у різних дослідних басейнах. У роботі пропонується порівняння результатів випробувань двох моделей яхт із значеннями опору води, отриманими з використанням кількох розрахункових схем. Результати випробувань моделей двох яхт порівнювалися з результатами статистичних розрахунків та результатами розрахунків за схемою з використанням конкретних даних дослідного басейну. Проведено розрахунок потужності двигунів швидкохідних суден з подальшим порівнянням розрахункових та реальних значень. Як приклад проведено розрахунок потужності двигунів для кількох швидкісних поромів.

**Ключові слова:** ходкість, перехідний режим, супротив води.

**Introduction.** Preliminary calculation of the water resistance to the movement of the vessel, at the first stages of the project, is extremely important, as it is associated with further improvement of the shape of the ship's contours, assessment of the weight load, layout of the premises. Currently, there are many programs for this type of calculation. These programs are based on model test data in towing tanks, data on real ships, approximate formulas, such as the Admiralty formula. If it is possible to compare several types of calculations, then there are additional opportunities for analysis. The formulas obtained using statistical analysis, based on data from a large number of tests in the towing tanks, take into account many parameters of ship hulls: relative length,

block coefficient, the ratio of the vessel's width to its draft, and much more. It becomes possible to compare the calculation results using a statistical formula and real data obtained in the towing tanks for a real ship. Calculations of water resistance for ships of the transitional mode of motion are specific. When moving at relative speeds of this mode, the trim appears the area of the wetted surface changes. The choice of the type of propulsion is also related to the expected speed of operation of the vessel and, as a result, the required power of the main engine. The purpose of this article is to compare different variants for calculating the resistance of water to the movement of vessels in a transitional mode.

**The various modes of movement of the vessel.** The title of this article requires a more detailed analysis of the terms “high-speed” and “displacement”. For an approximate evaluation of the various modes of movement of the vessel, the Froude number based

on volume  $F_r = \frac{v}{\sqrt{g^3 \cdot \nabla}}$  usually are used.

Three modes are distinguished in the theory of ship design. These modes are determined by the nature forces maintain. If the weight of the vessel  $\Delta$  is completely balanced by the hydrostatic force, this mode is called displacement  $\Delta = \gamma V$ ,  $F_r < 1$ . With further increase of the speed of the vessel the bow rises, the bottom of the vessel will be moved with angle of attack to the surface of the water. Additional force directed perpendicular to the bottom of the vessel arises. This force can be decomposed into two components: hydrodynamic resistance of water and the hydrodynamic lift force  $Y$ . The transitional mode begins. The weight of the ship is balanced by two forces: the hydrostatic and hydrodynamic  $\Delta = \gamma V_1 + Y$ ,  $1 < F_r < 3$ . The hydrostatic force  $\gamma V_1$  is created by the submerged in the liquid part of the body of craft  $V_1$ . The transitional mode has been little studied, because the elements of displacement and planing are parts of the forces. Another difficulty for the study is a variable position of the vessel relative to the water at various speeds. A further increasing of speed leads to a further growth of hydrodynamic force, emersion of vessel and accordingly reducing of the hydrostatic force. The “planing mode” is the regime when hydrodynamic lift forces  $Y$  fully support the weight of the craft  $\Delta = Y$ ,  $F_r > 3$ .

Introduction. Preliminary calculation of the water resistance to the movement of the vessel, at the first stages of the project, is extremely important, as it is associated with further improvement of the shape of the ship's contours, assessment of the weight load, layout of the premises. Currently, there are many programs for this type of calculation. These programs are based on model test data in towing tanks, data on real ships, approximate formulas, such as the Admiralty formula. If it is possible to compare several types of calculations, then there are additional opportunities for analysis. The formulas obtained using statistical analysis, based on data from a large number of tests in the towing tanks, take into account many parameters of ship hulls: relative length, block coefficient, the ratio of the vessel's width to its draft, and much more. It becomes possible to compare the calculation results using a statistical formula and real data obtained in the towing tanks for a real ship. Calculations of water resistance for ships of the transitional mode of motion are specific. When moving at relative speeds of this mode, the trim appears the area of the wetted surface changes. The choice of the type of propulsion is also related to the expected speed of operation of the vessel and, as a result, the required power of the main engine. The purpose of this article is to compare

different variants for calculating the resistance of water to the movement of vessels in a transitional mode.

The various modes of movement of the vessel. The title of this article requires a more detailed analysis of the terms “high-speed” and “displacement”. For an approximate evaluation of the various modes of movement of the vessel, the Froude number based on volume  $F_v = \frac{v}{\sqrt{g^3 V}}$  usually are used.

Three modes are distinguished in the theory of ship design. These modes are determined by the nature forces maintain. If the weight of the vessel is completely balanced by the hydrostatic force, this mode is called displacement  $\Delta = \gamma V$ ,  $F_v < 1$ . With further increase of the speed of the vessel the bow rises, the bottom of the vessel will be moved with angle of attack to the surface of the water. Additional force directed perpendicular to the bottom of the vessel arises. This force can be decomposed into two components: hydrodynamic resistance of water and the hydrodynamic lift force  $Y$ . The transitional mode begins. The weight of the ship is balanced by two forces: the hydrostatic and hydrodynamic  $\Delta = \gamma V_1 + Y$ ,  $1 < F_v < 3$ . The hydrostatic force  $\gamma V_1$  is created by the submerged in the liquid part of the body of craft  $V_1$ . The transitional mode has been little studied, because the elements of displacement and planing are parts of the forces. Another difficulty for the study is a variable position of the vessel relative to the water at various speeds. A further increasing of speed leads to a further growth of hydrodynamic force, emersion of vessel and accordingly reducing of the hydrostatic force. The “planing mode” is the regime when hydrodynamic lift forces  $Y$  fully support the weight of the craft  $\Delta = Y$ ,  $F_v < 3$ .

International Code of Safety for High-Speed Craft [1], and some national rules [2] give another definition of modes.

“Displacement mode” means the regime, whether at rest or in motion, where the weight of the craft is fully or predominantly supported by hydrostatic forces.

“Non-displacement mode” means the normal operational regime of a craft when non-hydrostatic forces substantially or predominantly support the weight of the craft.

“Transitional mode” means the regime between displacement and non-displacement modes.

For simplicity, the first half of the transition regime,  $1 < F_v < 2$ , is classified as a displacement mode, and it can be assumed that the hydrostatic forces predominantly or fully support the weight of the vessel. This separation allows further facilitate the solution of problems of designing ships.

The Registro Italiano Navale [3] defines ship as speed if its velocity m/s  $v_{max} \geq 3,7V^{0,1667}$ , where  $V$  is displacement volume.

Mode of the movement of the vessel is characterized by the Froude number based

on volume  $F_v = \frac{v}{\sqrt{g^3 V}} \rightarrow v = 3,13 F_v V^{0,1667}$ . The value  $F_v = \frac{v}{\sqrt{g^3 V}}$  is obtained by equating the right sides of these two equations. Hence, the vessel can be regarded as high when

$$F_v = \frac{v}{\sqrt{g^3 V}} \geq 1,18.$$

Total resistance and its components. In the design of the ship surface of the speed vessels, the optimal ratio of the main dimensions and the coefficients of the hull should be carefully selected. These options have a paramount influence on the propulsion of the vessel, its stability and displacement. The issue is particularly relevant for

transitional mode boats, because in these conditions the resistance of the water increases.

The residuary resistance plays a major role in the total resistance by increasing the wavemaking component. Such parameters as the form of contours, relative length, bottom deadrise angle, narrowing of the aft, need attention.

Total resistance and its parts are shown on the Fig. 1.

The experimental experience. Regarding resistance of high-speed vessels, large experimental experience exists.

In the transitional mode, at low values of the load coefficient  $c_D = \frac{\Delta}{\gamma B^3}$ , V-shaped forms and combined (mixed) forms are preferred. At low speeds V-shaped forms yield combined. The recommendations for the using U-shaped and V-shaped forms are offered, Figure 2 [4]. In the same paper noted that at the beginning of the transitional mode, the option with combined forms: “hard” chine at aft and “soft” chine at the bow are preferred. It is necessary to clarify that in this mode, hydrodynamic lift force appears and therefore it is necessary to design the flat portions of the bottom at the stern, for its effective use.

Among the works that have been devoted to the transitional mode, are the following below.

In 1963, Beys published a study of a series of geometrically similar models with relative length  $\frac{L}{B} = 2,5 - 6,0$ , Dandson Laboratory of the Stevens Institute of Technology.

Lindgren, Williams presented results of the research of the series of 9 models of high-speed round bilge displacement vessels in the Swedish State Shipbuilding Tank (SSPA).

Length displacement ratio was assumed to be  $\frac{L}{\sqrt[3]{\Delta}}$  6, 7 and 8; relative width  $\frac{B}{d} = 3.0, 3.5$  and 4.0. Block coefficient was assumed constant  $c_b = 0.4$  for all models, and the relative length  $\frac{L}{B}$  ranged from 4.6 to 8.2. Speed range of Froude number was  $F_n = 0.4-1.2$ .

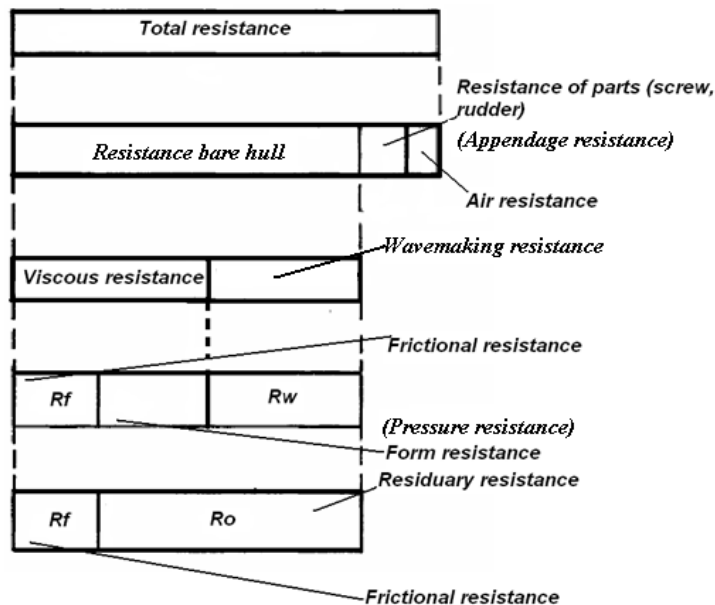


Fig. 1. Total resistance and its components

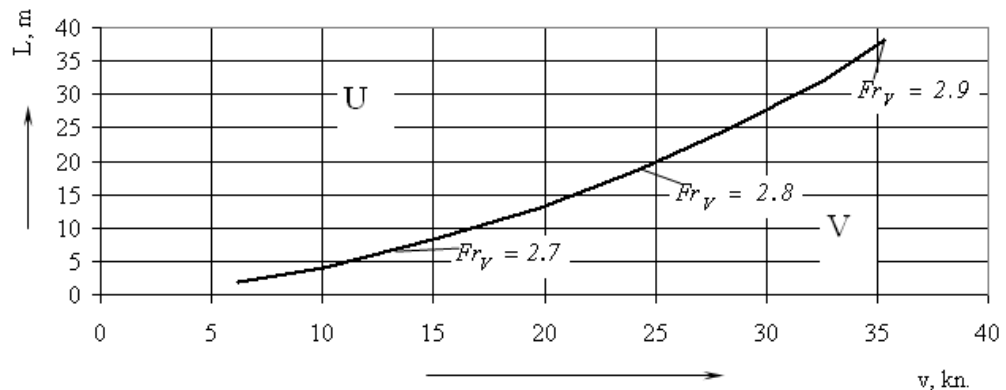


Fig. 2. Application of frames with different shapes at different relative speeds

A very useful work Marwood and Bailey was published in 1976. They conducted tests in the British National Physical Laboratory in relation to a systematic series of 22 models varying relationships  $\frac{L}{B}$  and  $\frac{B}{d}$ , while maintaining constant  $c_b = 0.397$  and  $c_p = 0.693$ . The speed changes in the number range  $F_r = 0.3-1.2$ .

Brown diagrams are used to determine the residuary resistance of vessels with  $\frac{L}{B} = 3,5-7,4$ ,  $\frac{B}{d} = 3,1-4,4$ ,  $c_b = 0,29-0,54$  at the end of the displacement mode and transitional mode. The data cover ships with the U- and V-shaped contours.

Volodin diagram is built on the basis of large experimental data and help to determine the residuary resistance for round bilge speedboats depending on the length displacement ratio for different number  $F_{rv}$ . The calculation of the frictional resistance produced by the wetted surface of the body corresponding to the static position of the ship.

Nordstrom series of tests is made on the basis of 14 round bilge models, the characteristics of which were as follows:  $\frac{L}{B} = 4,83-6,94$ ,  $\frac{B}{d} = 3,16-3,57$ ,  $c_b = 0,373-0,410$ ,  $c_p = 0,576-0,599$ ,  $x_c = -1,79-2,88\%$ ,  $\frac{\Omega}{\sqrt{VL}} = 2,67-2,7$ , half angle of entrance  $i_E = 15,1-22,5^\circ$ .

The systematic Groot series published in 1951, according to test 31 models of high-speed round bilge boats. The geometrical characteristics of hulls are as follows:  $\frac{L}{B} = 3,53-10,09$ ,  $\frac{B}{d} = 2,72-6,58$ ,  $c_b = 0,293-0,560$ ,  $c_p = 0,463-0,791$ ,  $x_c = -11,5-3,09\%$ ,  $\frac{\Omega}{\sqrt{VL}} = 2,75$ . Materials widely used at present in the development of forms of speedboats.

Series 64 – test of 27 models of high-speed round bilge boats in Taylor towing tank, 1965. During the tests, the relative length, the beam draft ratio, the block coefficient varied. Models have  $\frac{L}{B} = 8,454-18,264$ ,  $\frac{B}{d} = 2-4$ ,  $c_b = 0,35-0,55$ ,  $c_p = 0,63$ ,  $\frac{\Omega}{\sqrt{VL}} = 2,6-3,0$ ,  $i_E = 3,7-7,8^\circ$ .

The estimation of propulsion. The data have been obtained from various sources (Brown, Volodin, Nordstrom, Groot, SSPA and NPL), were analyzed to estimate the approximate value  $\frac{R}{\Delta}$  and its dependence on the parameters of transitional regime vessels. A series of tests included a large range of values  $\frac{L}{B}$ ,  $\frac{B}{d}$ ,  $c_b, c_p$ , and various forms of hull, with the U- and V-shaped contours, vary the half angle of entrance [5]. Results of the study based on the relative residuary resistance  $\frac{R}{\Delta}$  and values  $l = \frac{L}{\sqrt[3]{V}}$  shown on

Figure 3 [6]. The residuary resistance is quite a large part, on the average, about 70% of the total resistance in the transitional mode.

Using the method least squares, Formula (1) was obtained. This formula allows us to estimate relative resistance at a relative speed  $F_{rv} = 1$ .

$$\left(\frac{R_o}{\Delta}\right)_1 = 4,89 \left(\frac{L}{\sqrt[3]{V}}\right)^{-2,96} \quad (1)$$

Evaluation of water resistance R, in the design of high-speed vessel is very important because it is directly linked with the choice of main engine power  $N = \frac{R_o}{\eta_s \eta_G \eta_H} = \frac{R_o}{\eta_p}$ , where  $v$  – speed of the vessel,  $\eta$  – efficiency propeller, open water;  $\eta_G$  – efficiency, gearing;  $\eta_H$  – efficiency, hull;  $\eta_s$  – efficiency, shafting;  $\eta_p$  – efficiency, propulsive.

The value  $\eta_p$  is maximized rational choice of the type of propulsion, depending on the given design speed. Figure 4, average data of [7] is shown. At speeds less than 40 knots, the use of a propeller is possible for more high-speed vessels fully cavitating propeller is preferred. Some ships equipped a combination of the jet propulsion and propeller («Isola di Stromboli»). This option gives opportunity to vary the speed of quality in the operation of the vessel.

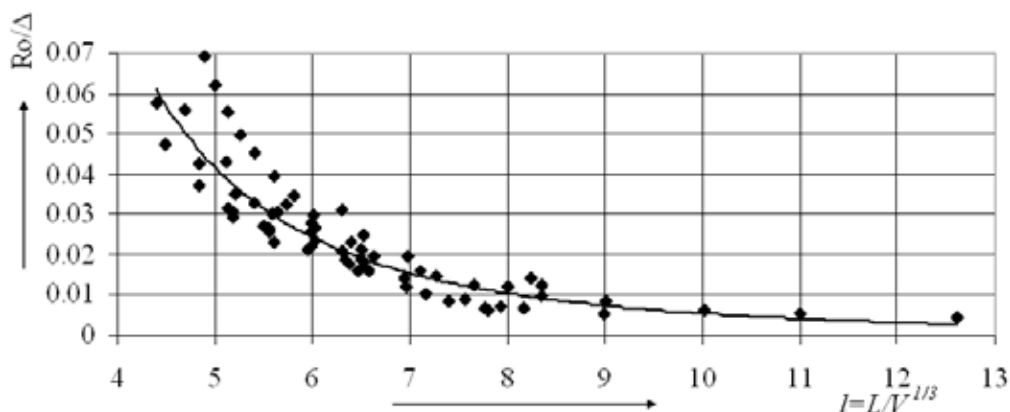


Fig. 3. Relative residuary resistance  $\frac{R_o}{\Delta}$  on  $l = \frac{L}{\sqrt[3]{V}}$ , at  $F_{rv} = 1$

The most common method of calculation – a breakdown of the total resistance RT into two components: the frictional resistance  $R_f = \zeta_F \frac{\rho v^2}{2} \Omega$  ( $\zeta_F$  – frictional resistance coefficient of a body,  $\rho$  – the density of water) and residuary resistance  $R_o$ .

Changes in average draft, while moving in the transitional regime, entails a change in the wetted surface area  $\rho$ . This change can be taken into account by using the Bunkov researching [8]. The study involved a test series of 37 models of high-speed monohull vessels with “hard” chine and combined (mixed) forms and transom stern. During the tests the relative centre of gravity (measured from transom) and the load coefficient of models  $c_D = \frac{\Delta}{\gamma B^3}$  varied.

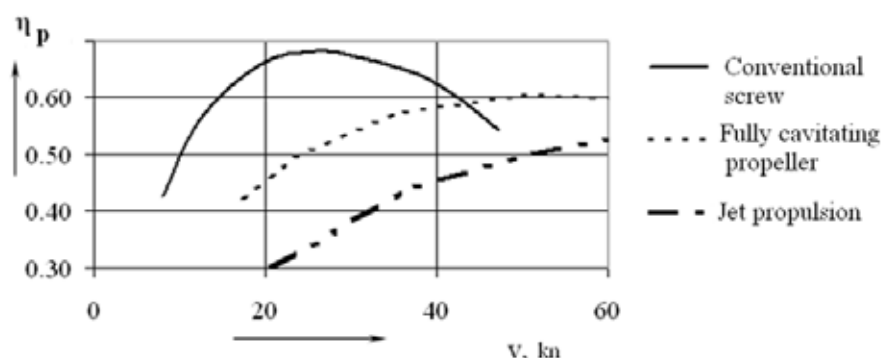


Fig. 4. Efficiency propulsive values for different types of propulsion

The following calculation scheme is possible:  $F_v \rightarrow l = \frac{L}{\sqrt[3]{v}} \rightarrow R_o$  – residuary resistance  
 $\rightarrow \zeta f$  – frictional resistance coefficient of a body with considering roughness allowance  
 $\rightarrow \Omega$  – wetted surface area, Bunkov test results  $\rightarrow R_f = \zeta_f \frac{\rho v^2}{2} \Omega$  – frictional resistance  
 $\rightarrow R_T = R_o + R_f$ .

For definition of frictional resistance coefficient  $\zeta f$  is possible after calculation Reynolds number,  $R_e = \frac{L v}{\gamma}$ , where  $\gamma = 1,2 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{sek}$  – viscosity of water.

Air resistance is determined by the expression  $R_a = 0,5 c \rho_a (v \pm v_w)^2 S_a$ . In this formula  $c$  – air resistance coefficient, for high-speed vessels – 0,4-0,6;  $\rho_a = 1,226 \cdot \text{kg} / \text{m}^3$  – density of air;  $v$  – vessel speed;  $v_w$  – the projection of the wind speed in the direction of movement of the vessel, m/s (the plus sign to the headwind, the minus sign – for passing);  $S_a$  – area exposed to wind,  $\text{m}^2$ .

The value of air resistance, for example, for ship «Volcan de Tauro» is 3% of the bare hull resistance. With greater accuracy air resistance is determined using the results of wind tunnel models.

To check the effectiveness of method, test calculations were carried out, Table 1. The information about the movement of the ferry “Guizzo” against the wave is in the article [9].

Table 1

**Power of engine of high-speed monohull ferry**

Name ship	Speed, kn.	Power of engine, mWt		Error, %
		real	calculation	
Guizzo	40	28.0	28.0	0
Albayzin	40	21.6	21.0	2.8
Isola di Capri	29	9.4	10.0	2.8
Pegasus One	36	24.0	29.0	17

In table 2, the main dimensions of two yachts are recorded. The general arrangement of one of these yachts is shown in Figure 5. Models of these vessels were tested in the Vienna Model Basin. The first of these yachts belongs to the class of high-speed vessels; the relative speed of the vessel is  $F_{rv} = 1,2$ . The second ship has a relative speed of  $F_{rv} = 1$  which is typical for the beginning of the transitional mode of motion.

For more information on the designation of the navigation area for these yachts, see the article [10].

Table 2

Main dimensions of two yachts

Length $L_{pp}$ , m	Width $B$ , m	Draft $d$ , m	Displacement, t	Speed $v$ , kn	Power of main engines, kW
34	7.48	2.57	310.1	16	2 x 1000
48	10.09	2.68	590	16.5	2 x 1200

In order to compare the results of calculations: tests of models in the towing tank, calculations made according to the scheme described above and calculations using formula (1), Figure 6 was constructed. It can be seen from the graph that the calculations made using the scheme and the test results in the towing tank are practically the same. The results of calculations by formula (1) differ from the test results by 15%.

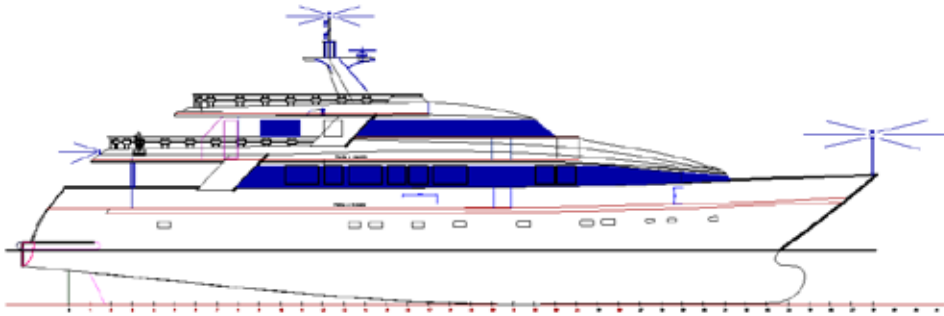


Fig. 5. Part of the general arrangement of Yacht (length 34 m)

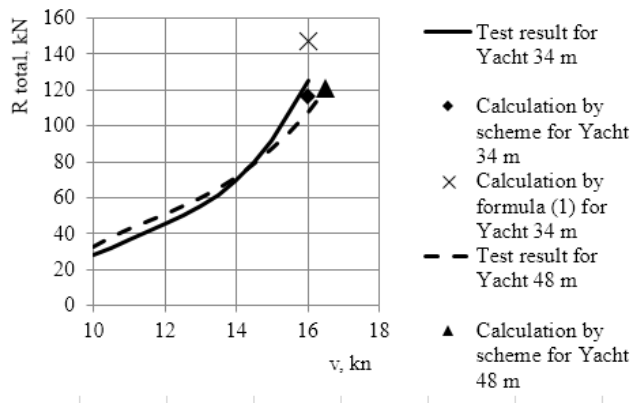


Fig. 6. Results of tests and calculations according to the scheme and formula (1)

**Conclusions.** As a result of calculating the water resistance according to the scheme and using the formula  $\left(\frac{R_o}{\Delta}\right)_1 = 4,89 \left(\frac{L}{\sqrt[3]{V}}\right)^{-2,96}$ , results were obtained that make it possible

to evaluate the accuracy of these methods. The error in applying both methods can range from 0 to 17%. When applying the calculations by scheme, it is necessary to carefully choose the graph for calculating the residuary resistance. The parameters of the models, on the basis of the tests of which such a graph is built, should correspond as much as possible to the parameters of a real vessel.

#### REFERENCES

1. International Maritime Organization. International Code of Safety for High-Speed Craft. London. TCO. 2000.
2. Germanischer Lloyd. Rules for Classification and Construction. High Speed Craft. Hamburg. Germanischer Lloyd SE. 2012.
3. Registro Italiano Navale. Rules for the Classification of High-Speed Craft. Genova. RINA. 2015.
4. Levi B.Z. Passenger ships of coastal navigation. Shipbuilding. 1975.
5. Alivagabov M.M. and others. Reference book on small shipbuilding. Shipbuilding. 1988.
6. Kanifolskyi O.O. EEDI (energy efficiency design index) for small ships of the transitional mode. Trans RINA. Vol 156. Part B1. Intl J Small Craft Tech. 2014. P. 39-41.
7. Tsarev B.A. Optimal design of high-speed vessels. LSI. 1988.
8. Zhinkin V.B. Propulsion of the fast ships. LSI. 1980.
9. Valerio Ruggiero, Oleksandr Kanifolskyi. "One digit" Estimation of navigation area parameters for a monohull fast ferry". NAV 2022 Technology and science for the ships of future – 20th edition. 15-17 giugno 2022. Genova.
10. Oleksandr Kanifolskyi, Valerio Ruggiero. Four points of view on the designation of the navigation area for yachts. JMSE Journal of marine Science and Engineering. 2022. 10(6). <https://doi.org/10.3390/jmse10060801>

## DYNAMIC SIMILARITY OF ELECTRIC SHIPS' PROPULSIVE COMPLEXES

Shumylo O.M.<sup>1</sup>, Yarovenko V.O.<sup>2</sup>, Zaritska O.I.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ph.D, Professor at the Department of Ship Power Plants and Technical Operation,  
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0003-0574-1954

<sup>2</sup>Dr. of Eng., Head of the Department of Operation  
of Ship Electrical Equipment and Automation,  
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0003-3183-6583

<sup>3</sup>Ph.D, Associate Professor at the Department of Operation  
of Ship Electrical Equipment and Automation,  
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-8530-1106

### Summary

**The purpose of the research** is to develop methods for analyzing the maneuvering modes of ship propulsion systems based on the theory of dynamic similarity. **Methodology.** On maneuvers, all components of the complexes operate in transient modes, significantly influencing each other; therefore, the analysis of the operation modes of any component is considered in unity with the others. The necessity of transition to generalized mathematical models is substantiated. The dynamic similarity criteria are found. There is a possibility of broad generalization of research results. **Results.** A mathematical model and a method for calculating the transient modes of electric ships' propulsion complexes have been developed. The generalized dimensionless parameters of the complex are found. The expediency of conducting research in relation to these parameters and dynamic similarity criteria are substantiated. A technique for conducting research using the provisions of dynamic similarity theory has been developed. The possibilities of using the technique are illustrated by the example of calculating the maneuvering characteristics and assessing the loads on the electric power plant when the electric ship enters circulation. The possibility of using the developed technique in the search for ways to improve complexes' maneuverability is shown. **Scientific novelty.** The use of dynamic similarity criteria and generalized dimensionless parameters makes it possible to cover a large class of ships in research. Electric ships with equal values of similarity criteria and equal values of generalized parameters will have the same laws of change of regime indicators and equal values of maneuvering quality indicators. It becomes possible to level the influence of inaccuracies in the assessment of external factors on the results of research. **Practical significance.** The recommendations, analytical ratios, diagrams for assessing the quality of maneuvering, developed on the basis of the theory of similarity, cover a whole series of electric ships and are ready for use. They contribute to the construction of electric ships with predictable maneuvering properties. Bible 15, Tab. 2, Fig. 1.

**Key words:** electric ship's propulsion complex, dynamic similarity, analysis of maneuvering modes.

ДИНАМІЧНА ПОДОБА ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ ЕЛЕКТРОХОДІВ

Шумило О.М.<sup>1</sup>, Яровенко В.О.<sup>2</sup>, Зарицька О.І.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., професор кафедри суднових енергетичних установок і технічної експлуатації,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0003-0574-1954

<sup>2</sup>д.т.н., професор, завідувач кафедри експлуатації суднового електрообладнання  
і засобів автоматики,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0003-3183-6583

<sup>3</sup>к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-8530-1106

**Анотація**

**Мета досліджень** у розробці методів аналізу маневрених режимів суднових пропульсивних комплексів на основі теорії динамічної подоби. **Методика.** На маневрах всі складові комплекси працюють на перехідних режимах, істотно впливаючи одна на одну, тому аналіз режимів роботи будь-якої складової розглядається в єдності з іншими. Обґрунтовано необхідність переходу до узагальнених математичних моделей. Знайдено критерії динамічної подоби. З'являється можливість широкого узагальнення результатів досліджень. **Результати.** Розроблено математичну модель та метод розрахунку перехідних режимів пропульсивних комплексів електроходів. Знайдено узагальнені безрозмірні параметри комплексу. Обґрунтовано доцільність проведення досліджень стосовно цих параметрів та критеріїв динамічної подоби. Розроблено методіку проведення досліджень із використанням положень теорії динамічної подоби. Проілюстровано можливості використання методики на прикладі розрахунку маневрених характеристик та оцінки навантажень на електроенергетичну установку при виході електроходу на циркуляцію. Показано можливість використання розробленої методики при пошуках шляхів покращення маневреності комплексів. **Наукова новизна.** Використання критеріїв динамічної подоби та узагальнених безрозмірних параметрів дає можливість охопити дослідженнями великий клас суден. Електроходи з рівними значеннями критеріїв подоби та рівними значеннями узагальнених параметрів матимуть однакові закони зміни режимних показників та рівні значення показників якості маневрування. З'являється можливість нівелювання впливу неточності щодо оцінки зовнішніх чинників на результати досліджень. **Практична значимість.** Розроблені на основі теорії подібності рекомендації, аналітичні співвідношення, діаграми для оцінки показників якості маневрування охоплюють цілі серії електроходів, готові до застосування, та сприяють побудові електроходів із заздалегідь прогнозованими маневреними властивостями. Бібл. 15 табл. 2, рис. 1.

**Ключові слова:** пропульсивний комплекс електрохода, динамічна подоба, аналіз маневрених режимів.

**Relevance of research and problem statement.** Electric propulsion is a stable trend in the development of modern shipbuilding. Its most important advantage over the traditional ship propeller drive is the ability to provide high maneuverability for

ships that are equipped with power plants of this type. It is these propulsion systems that ensure the safety of maneuvering operations. If, at the same time, the complex also includes active propulsion control means, the vessel's maneuvering properties can hardly be overestimated.

Propulsion electric power plants, most often, are designed on the basis of asynchronous frequency-controlled propulsion motors. They can be made both according to the classical version, and according to the version of the Azipod propulsion and steering complex (in this case, the rudder is not needed). In turn, propulsion electric power plants are part of a single ship electric power system that provides power to both the electric propulsion system itself and general ship consumers of electricity. Thus, the ship's propulsion complex is a complex system that combines many components with the most diverse physical processes occurring in them. An enlarged block diagram of such a propulsion complex is shown in Fig. 1.

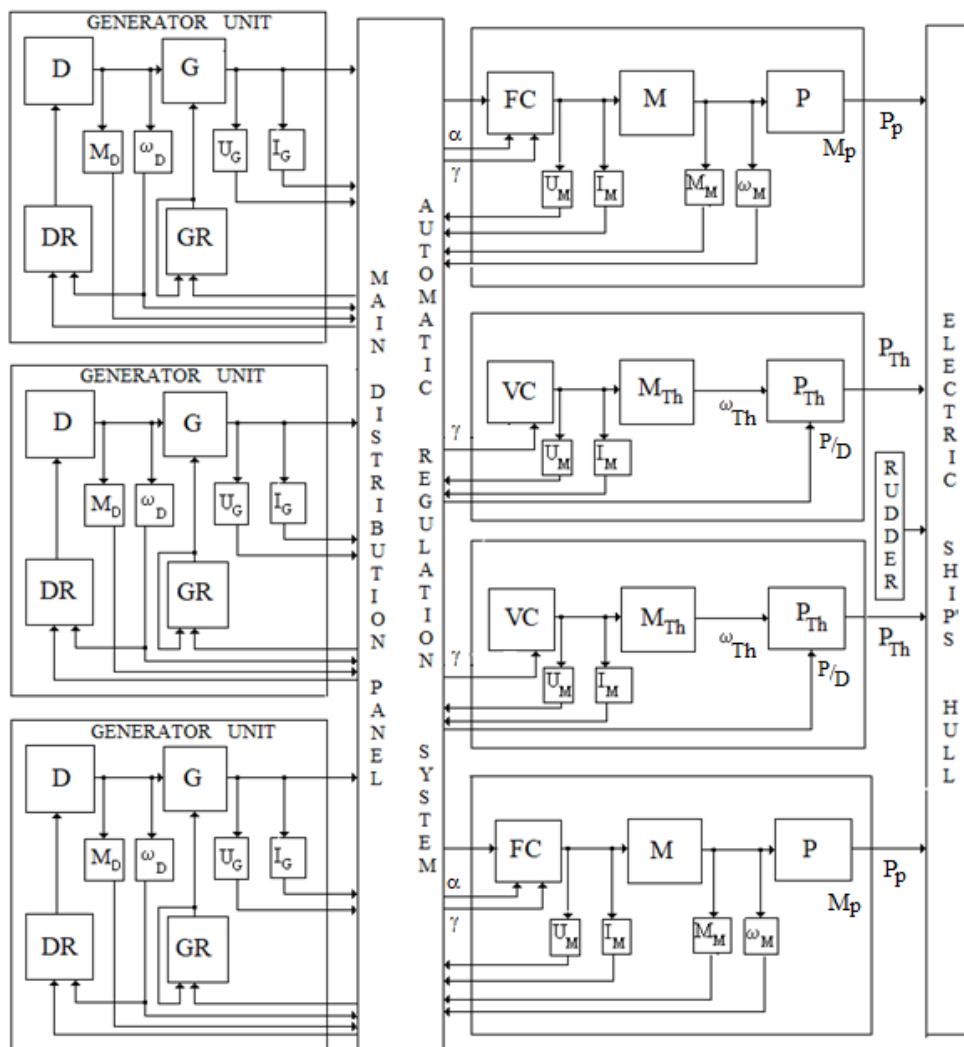


Fig. 1. Structural diagram of the electric ship's propulsion complex

The complex includes: heat engines  $D$  with frequency rotation regulators  $DR$ ; synchronous generators  $G$  with voltage regulators  $GR$ ; frequency converters  $FC$ ; asynchronous propulsion motors  $M$ ; propellers  $P$ ; thrusters' voltage converters  $VC$ , propulsion motors  $M_{Th}$  and propellers  $P_{Th}$ ; rudder  $R$  and hull. (In each specific case, individual elements may be absent in the block diagram.)

When maneuvering the ship, all these components operate almost continuously in transient modes, while exerting a significant influence on each other. That is why the analysis of the maneuvering operation modes of any element of the ship's propulsion complex must be considered in unity with all other components.

The issues of designing modern electric ships with high maneuverability and the tasks of improving the control of propulsion electric power plants of ships in operation are currently very relevant. Moreover, the need to assess the maneuverability of newly built electric ships arises already at the initial stages of their design or modernization, and improving the efficiency of the maneuvering operations of existing ships is undoubtedly relevant at any stage of their life cycle.

**The State of the Issue.** The methods of mathematic modeling of electric ships' transient and steady operation modes during maneuvers are widely used in the process of designing and developing recommendations to find best ways of controlling the complexes. At the same time, there arise a number of problems, the solution of which results in essential difficulties.

The first problem is that in the vast majority of studies, the propulsion electric power installation is considered [1, 2] in isolation from a single ship propulsion complex. Transient processes in each element of the complex are described by mathematical equations in more or less detail, depending on the goals of the research. As a rule, such a description is based on the assumption that the rest of the objects that make up the complex operate in a steady state, and the influence of the environment is taken into account approximately [3, 4, 5]. However, the mathematical description of any real object corresponds only more or less approximately to the real processes occurring in the object. Insufficient mathematical base as the basis for describing the interaction of an object with the environment significantly reduces the reliability of the results obtained. The results of experimental studies are most often used to obtain reliable information about these processes [3]. However, such tests are expensive, and represent a special case (or special cases). The validity of the distribution of these results on other objects (even on objects of the same type) is problematic and is often associated with a low degree of accuracy.

At the same time, when analyzing complex systems, which undoubtedly include the ship's propulsion complex, there inevitably arises the question of the necessary and sufficient degree of accuracy in describing the processes occurring in each component of this complex. This accuracy, first of all, depends on the stated goals and criteria for assessing the quality of the operation of the complex, as such, and its components, in particular. And each of the factors influencing the behavior of the complex can be significant for some quality criteria and completely insignificant for others. This situation becomes even more complicated when the system includes objects that are completely different in nature of the physical processes occurring in them. In such cases, the task arises in leveling (reasonably) the influence of inaccuracies in the assessment of certain parameters on the calculation results.

In the vast majority of cases, studies of the electric ships' maneuverability relate to individual devices of the ship's propulsion complex [6, 7] and to specific maneuvers [8, 9, 10]. Their purpose is to build the trajectory of the vessel motion, assess the loads on certain components of the complex, create and construct simulators for ship complexes, etc. With this approach, each individual component is separated from a single propulsion complex and is considered on the assumption that all other parts operate in a steady state. However, such an assumption is valid only for steady-state operating modes, and, as for transient ones, it leads to significant inaccuracies.

Second problem. The goal and end result of any scientific research is the possibility of generalizing the results obtained and the prospects for predicting the behavior of the objects under study (and objects similar to them), at least in typical and in the most typical situations. Research should cover the widest possible class of objects (the widest possible class of ships). They should contribute both to the creation of new electric ships with predetermined properties, and to an increase in the efficiency of the operation of already existing ones.

The solution of all these problems is possible on the basis of the theory of dynamic similarity. Considering a dynamically similar ship propulsion complex, identifying the criteria of dynamic similarity and complex generalized parameters, we can:

- cover with the results of research a wide class of ships of the type under consideration;
- neutralize the influence of a low degree of accuracy in determining a number of physical parameters and interactions on the final results of research and on the recommendations being developed (they can be easily corrected after clarifying the values of these parameters and interactions);
- develop, in the form of ready-made analytical expressions or diagrams, recommendations for the design and control of propulsion systems with predictable performance indicators.

The development of a methodology for constructing such studies is the **goal of this work**.

**Analysis of dynamically similar propulsion complexes.** As can be seen from Fig. 1, the complex includes a large number of components with different physical principles of operation. These parts are connected to each other by an automatic control system with a large number of feedbacks. The main parameters connecting the power units and control signals are:  $M_D$  and  $\omega_D$  – torque and angular velocity of the heat engine;  $U_G$  and  $I_G$  – generator voltage and current;  $U_M$ ,  $I_M$ ,  $M_M$  and  $\omega_M$  – voltage, current, torque and angular speed of rotation of the propulsion propelling motor;  $M_p$  and  $P_p$  – propeller torque and thrust;  $M_{Th}$ ,  $\omega_{Th}$ ,  $P_{Th}$  – torque, angular velocity and propeller thrust of the thrusters;  $\alpha$  and  $\gamma$  – the relative frequency and voltage at the output of the converters;  $P/D$  – the pitch ratio of the thruster propeller.

Even the general view of the block diagram gives an idea of the degree of complexity of the mathematical model that describes the transient operation modes of the complex. One of its variants, as applied to the classical layout of a propulsion electric power plant, is given in [12]. This model includes a large number of differential and algebraic equations. It follows from it that hundreds of parameters influence the nature of the course of transient processes, the indicators of the maneuvering quality. These are both the design parameters of the propulsion system, and the parameters determined by the conditions for performing maneuvers, and the parameters of control actions. Such

a situation does not allow us to assess correctly the degree of influence of each parameter separately and also does not allow assessing the degree of influence of the effects of these parameters' interactions. Moreover, it is impossible to predict the influence of these parameters on the maneuvering quality indicators, and it is impossible to predict electric ships' maneuvering characteristics, as well.

It should also be remembered that in the process of studying maneuvering modes, the results of any calculation performed in relation to any particular electric ship are only partial. This is the solution of a separate specific problem (calculation of any maneuver) in relation to a specific electric ship in certain external conditions and in a specific situation. The scientific value of such calculations is not great. It is worth changing any design parameter of the electric ship or the conditions for performing the maneuver, and the result of the calculation will be different.

To give generality to the results of the analysis, one should use the concept of an approximate dynamically equivalent complex [13] and reduce the model to dimensionless units. This will allow converting the regime indicators to relative units and identifying the dimensionless parameters of the electric ships' propulsion complexes.

To do this, we introduce the concept of the basic operation mode and, accordingly, the basic values of the mode indicators. As such (they are marked with the index "0"), we take the values corresponding to the operation of the complex in the nominal steady state, when the vessel is moving in free, deep, calm water in a direct course. Then the relative values of regime indicators will be defined as the ratio of the current values to the base values. They will be marked by a dash symbol. For example, the relative electromagnetic moment of the generator

$$\overline{M}_G = \frac{M_G}{M_{G0}}. \quad (1)$$

Such transformations are carried out with all regime indicators of the complex. The exception is relative time. It is defined differently:

$$T = \frac{v_0}{L} t, \quad (2)$$

where  $v_0$  – is the speed of the ship,  $L$  – is the length of the ship,  $t$  – is the current time.

Below, as an example, the basic equations obtained, in this way, from the generalized mathematical model of transient modes are presented here. These are the equations describing the inertial components of the propulsion system [12].

The equation of the generating set motion:

$$\frac{d\overline{\omega}_D}{dT} = N_D (\overline{M}_D - \overline{M}_G), \quad (3)$$

where  $N_D$  – is a dimensionless parameter

$$N_D = \frac{M_{D0} L}{J_D \omega_{D0} v_0}; \quad (4)$$

$J_D$  – is the moment of inertia of the engine and generator reduced to the heat engine shaft;

The dimensionless parameter  $N_D$  – is a dynamic similarity criterion of the system: heat engine – synchronous generator. Complexes with equal values of this criterion will have the same (in relative terms) laws of change of regime indicators in relative time.

Synchronous generator excitation current

$$\frac{d\bar{I}_f}{dT} = N_f \left( K_{f1} K_{Uq} \bar{U}_q + K_{f2} K_{Id} \bar{I}_d - K_{f3} K_U \left( \bar{U}_G - (1 - \Delta \bar{U}_{H1}) \right) - \bar{I}_f \right), \quad (5)$$

where  $N_f$  – is the dynamic similarity criterion

$$N_f = \frac{L U_{f0}}{L_f I_{f0} v_0}; \quad (6)$$

$L_f$  – is the inductance of the excitation winding;  $U_f$  and  $I_f$  – are the voltage and current of the excitation winding;  $\Delta \bar{U}_{H1}$  – is the voltage difference between generators operating in parallel;  $K_{f1}, K_{f2}, K_{f3}$  – are gain coefficients of the automatic control system  $\bar{U}_d$  and  $\bar{U}_q$ ,  $\bar{I}_d$  and  $\bar{I}_q$  – are the generator voltage and current according to internal  $d$ - $q$  coordinates;  $K_{d1}, K_{q1}, K_{q2} = 1, K_{Uq}, K_{Id}, K_U$  – are the generalized dimensionless parameters.

The equation of motion of the propulsion motor

$$\frac{d\bar{\omega}_M}{dT} = N_M \left( \bar{M}_M - \bar{M}_P \right), \quad (7)$$

where:  $N_M$  – is the dynamic similarity criterion

$$N_M = \frac{M_{M0} L}{J_M \omega_{M0} v_0}; \quad (8)$$

$J_M$  – is the moment of inertia of the propulsion motor.

Equations of an electric ship motion in the  $GXYZ$  coordinate system associated with the ship:

$$\frac{d\bar{v}_X}{dT} = C_{\lambda 2} \bar{v}_Y \bar{\Omega}_Z + N_X \left\{ \sum_J K_{pj} \bar{P}_{ej} - C_{RX} \beta_{RP} \bar{v}^2 - \bar{R}_X \right\}; \quad (9)$$

$$\frac{d\bar{v}_Y}{dT} = -\frac{1}{C_{\lambda 2}} \bar{v}_X \bar{\Omega}_Z + \frac{N_X}{C_{\lambda 2}} \left\{ \sum_J K_{pj} \alpha_{jz} \bar{P}_{ej} + C_{RY} \beta_{RP} \bar{v}^2 \pm \sum_h k_h \bar{P}_{Thh} - \bar{R}_Y \right\}; \quad (10)$$

$$\frac{d\bar{\Omega}_Z}{dT} = -\frac{N_\Omega}{N_X} C_{\lambda 21} \bar{v}_X \bar{v}_Y + N_\Omega \left\{ \sum_J K_{pj} h_{pj} \bar{P}_{ej} + C_{RY} \bar{X}_R \beta_{RP} \bar{v}^2 \pm \sum_h k_h \bar{P}_{Thh} h_h + (\bar{M}_{PZ} - \bar{M}_{DZ}) \right\}, \quad (11)$$

where  $N_X$  and  $N_\Omega$  – are the dynamic similarity criteria

$$N_X = \frac{L \sum K_{pj} P_{ej0}}{(m + \lambda_{11}) v_0^2}; \quad (12)$$

$$N_\Omega = \frac{L^3 \sum K_{pj} P_{ej0}}{2(J_Z + \lambda_{66}) v_0^2}; \quad (13)$$

$P_{ej}$  and  $K_{pj}$  – are the useful thrust of the propeller and its share in the total flow, respectively;  $\sum_h k_h \bar{P}_{Thh}$  – is the total thrust of thruster propellers;  $\sum_h k_h \bar{P}_{Thh} h_h$  – is the total torque of the thruster propellers relative to the ship's center of gravity.  $\bar{R}_X$  and  $\bar{R}_Y$  – are the longitudinal and transverse components of water resistance to the vessel motion;  $(\bar{M}_{PZ} - \bar{M}_{DZ})$  – is the moment of resistance to the turn of the vessel;  $X_R$  – is the distance from the center of the coordinate system to the rudder;  $\rho$  – is water specific density;  $\lambda_{11}$  and  $\lambda_{22}$  – are the added water masses along the  $X$  and  $Y$  axes;  $J_Z$  – is the ship's

moment of inertia when rotating around the  $Z$  axis;  $\lambda_{66}$  – is the added moment of water inertia;  $\beta_{dr}$  – is the drift angle;  $\overline{P_{Th}}$ ,  $\overline{h_h}$  and  $k_{h^*}$  – are the relative thrust, its shoulder and the proportion of the thrust of the corresponding thruster at the maximum pitch ratio in the total thrust of the propulsive propellers; generalized dimensionless parameters:

$$C_{\lambda 2} = \frac{m + \lambda_{22}}{m + \lambda_{11}} ; \quad (14)$$

$$C_{RX} = \frac{\mu_{rx} \frac{\rho}{2} v_0^2 S_C (1 - \psi)^2}{\sum K_{pj} P_{ej0}} ; \quad (15)$$

$$C_{RY} = \frac{\mu_K \frac{\rho}{2} v_0^2 S_C (1 - \psi)^2}{\sum K_{pj} P_{ej0}} . \quad (16)$$

The control system in the general case forms:

- two control actions on the frequency converter – by frequency  $\alpha$  and by voltage  $\gamma$ ;
- voltage control signal  $\gamma$  to the thruster drive voltage converter;
- control signal by propeller pitch to the mechanism of change of thruster propeller pitch;
- a control signal for the angle of the rudder blade.

A complete mathematical model is given in [14]. It allows for a comprehensive analysis of the propulsion complex maneuvering modes. During the calculation, the current values of the main regime indicators of its components are calculated.

When converting the original model into a system of dimensionless units, the criteria for dynamic similarity and generalized dimensionless parameters of the propulsion complex were identified. These are the parameters of the system “heat engines – propulsion electric plant – propellers – rudder – ship's hull”. It is these parameters that determine the current values of the relative performance indicators of all the components of the complex and affect the numerical values of the main indicators of the quality of maneuvering. Relationships for calculating these parameters and similarity criteria are given in [14]. All further studies of the behavior of electric ships during maneuvers should be carried out in relation to these parameters – in fact, to some “generalized” parameters, which include in a certain combination both the design parameters of the complex and the parameters of the environment. Complexes with equal values of parameters will have the same laws of change in time of the main regime indicators. The transition to dimensionless parameters greatly reduces the variable parameters in the study of maneuvering modes.

The solution to the second problem, identified for research purposes, involves covering the widest possible class of vessels, with the possibility of expanding and generalizing the results of the study. To this end, it is necessary to calculate the numerical values of the identified generalized dimensionless parameters for existing ships (covering as many electric ships as possible) and determine the range of their values. Having considered the behavior of the complexes in the entire range of changes in the values of these parameters, it is possible to cover all vessels of the type under consideration by research.

Evaluation of the electric ships' maneuvering characteristics is carried out according to certain quality indicators. First of all, these are the inertial-braking characteristics, the controllability of ships and the load on their electric power systems. In [12],

a set of such indicators is proposed. They fully cover each component of the electric power plant and the entire electric ship as a whole. However, despite the transition to a system of dimensionless units, the number of generalized parameters still remains large. This complicates the analysis of maneuvering modes, and if we take into account that the number of maneuvering quality indicators themselves is more than forty [12], the solution of the set tasks becomes unfeasible.

The way out of this situation is to identify the parameters that significantly affect the indicators of the quality of maneuvering. In other words, from the set of parameters  $q_i, i=1, \dots, n$ , it is necessary to select a subset of parameters  $q_j, j=1, \dots, p (p < n)$ , the deviation of which from the calculated values  $\Delta q_j$  determines the main part of the increment of quality indicator  $J(\Delta q_j) \approx J(\Delta q_j)$ . The scatter of the values of the remaining parameters does not have a significant effect on the indicator under study, and changes in their values can be ignored.

The solution of such problems, as a rule, is carried out by the methods of screening experiments, which makes it possible to rank all the parameters of the complex and the effects of parameter interactions on the values of quality indicators. At the same time, it should be taken into account that for each quality indicator there will be its own set of significant parameters and significant effects of parameter interactions.

All further studies are carried out taking into account changes in these very significantly influencing parameters.

Let us illustrate the possibilities of the considered approach in the analysis of the electric ships' maneuvering properties. As an example, below are the results of an analysis of the maneuvering characteristics of an electric vessel when it enters circulation. A ship with a classic version of the layout of the electric power plant is considered. In [15], simplified analytical dependences of the main indicators of the quality of maneuvering on the similarity criteria and generalized parameters of the complex were developed. These dependences characterize the entry of the vessel into circulation:

– duration of circulation  $T_{man.}$  and its evolutionary period  $T_{ev}$

$$T_{man.} = 36,672 + 13,094N_X - 7,375C_{M16} + 3,484C_{65} + 4,563C_{61} - 4,344C_{\lambda 21} - 1,891N_X C_{M16} + 2,281N_X C_{65} + 3,953N_X C_{61} - 3,234N_X C_{\lambda 21} - 3,265C_{RY} + 1,867C_{M16} C_{\lambda 21}; \quad (17)$$

$$T_{ev} = 14,578 - 5,875N_X - 2,469C_{M16} - 0,782C_{61} + 1,141N_X C_{M16} - 1,106C_{22}; \quad (18)$$

– fuel costs for the maneuver  $G_{man}$

$$G_{man.} = 43,141 + 11,019N_X - 6,725C_{M16} + 3,533C_{65} + 4,693C_{61} - 4,636C_{\lambda 21} - 3,251C_{RY} - 2,848N_X C_{M16} + 2,3N_X C_{65} + 4,038N_X C_{61} - 3,138N_X C_{\lambda 21}; \quad (19)$$

– relative decrease in the speed of the ship in steady circulation  $\Delta v_{cir}$ ;

$$\Delta v_{cir} = 0,375 - 0,296N_X - 0,019C_{65} - 0,021C_{61} - 0,03C_{\lambda 21}; \quad (20)$$

– relative diameter of steady circulation  $D_{cir}$

$$D_{cir} = 6,81 + 4,909N_X + 0,885C_{65} + 1,224C_{61} - 1,21C_{\lambda 21} - 0,806C_{RY} + 0,69N_X C_{65} + 1,045N_X C_{61} - 0,815N_X C_{\lambda 21} - 0,422C_{M16} C_{\lambda 21}. \quad (21)$$

Here:  $N_X$ ;  $C_{M16}$ ;  $C_{22}$ ;  $C_{65}$ ;  $C_{61}$ ;  $C_{21}$ ;  $C_{\lambda 21}$ ;  $C_{RY}$  – are generalized dimensionless parameters of the electric ship's propulsion complex:

$$N_x = \frac{LP_{e0}}{(m + \lambda_{11})v_0^2}; \quad C_{22} = \frac{c_2 \cdot \frac{\rho}{2} v_0^2 F_H}{\sum K_{pj} P_{ej0}};$$

$$C_{M16} = \frac{\beta_{M0}}{r_M'^2} \left[ (b_M^2 + c_M^2 \alpha_0^2) + (d_M^2 + e_M^2 \alpha_0^2) \frac{r_{2M}^2}{\beta_{M0}^2} + 2r_{1M} \alpha_0 \frac{r_{2M}'}{\beta_{M0}} \right];$$

$$C_{\lambda 21} = \frac{2(\lambda_{22} - \lambda_{11})}{m + \lambda_{11}}; \quad C_{21} = \frac{0,5 C_Y^\beta \frac{\rho}{2} v_0^2 F_H}{P_0}; \quad C_{61} = \frac{2m_1 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_H}{P_0};$$

$$C_{65} = \frac{2 \left[ 0,739 + 8,7 \frac{T}{L} \right] C_{m0}^\omega \frac{\rho}{2} v_0^2 F_H}{P_0}; \quad C_{RY} = \frac{\mu_K \frac{\rho}{2} v_0^2 S_R (1 - \psi)^2}{\sum K_{pj} P_{ej0}},$$

where  $\omega_{M0}$  and  $\omega_{1Mh}$  – are angular speeds of rotation of the propulsion motor and the stator magnetic field at rated frequency;  $\beta_{M0}$  – is absolute slip of the  $M$  rotor;  $\alpha_0$  – is  $M$  relative voltage frequency;  $r_{1M}$  and  $r_{2M}$  – are stator active resistance and the reduced active resistance of the  $M$  rotor;  $b_{MP}$ ,  $c_{MP}$ ,  $d_{MP}$ ,  $e_{MP}$  – are constant coefficients of the frequency-controlled induction motor;  $C_Y^\beta$  – is coefficient of the positional hydrodynamic force acting on the ship's hull;  $F_H$  – is the reduced area of the submerged part of the ship's center plane;  $\rho$  – is specific water density;  $S_R$  – is the reduced area of the rudder blade;  $m^1$  – is coefficient of the positional resistance moment;  $C_{m0}^\omega$  – is coefficient of damping resistance moment.

These dependencies were obtained using the method of full factorial experiment. The ranges of changes of parameter values and similarity criteria (from minimum to maximum) are given in Table 1.

Table 1

Ranges of changes of parameter values

Parameter	Value ranges			
	Minimum	Average	Maximum	Project
$N_x$	0,06	0,13	0,20	0,132
$C_{M16}$	4,16	7,15	14,05	14,127
$C_{21}$	2,7	3,4	4,1	3,372
$C_{61}$	2,8	3,5	4,2	3,564
$C_{22}$	16	21	26	21,19
$C_{65}$	3	4	5	4,074
$Cl$	0,55	0,7	0,85	0,736
$C_{RY}$	1,1	1,5	1,9	1,532

Having calculated the numerical values of these parameters using the above ratios, it is possible to estimate the main parameters of the ship's circulation motion using ready-made simple analytical dependencies (17)-(21). Let's consider this on the example of an electric ship project with an electric power plant based on frequency-controlled propulsion motors.

The main characteristics of the vessel project: length according to design waterline 52 m; width 15 m; draft 4 m; displacement 1700 tons; power of the main engines 2200 kW; movement speed, at the rated power of the propulsion electrical installation, 7 m/s.

The power plant includes: two diesel generator sets, each of which contains a diesel engine with an effective power of 1100 kW at 750 rpm and a generator with a power of 100 kW at 750 rpm; frequency converters; two asynchronous propulsion motors.

Propulsion motors have the following main parameters: power 1000 kW; stator current 1100 A; power factor 0.835; torque 10670 Nm; angular velocity of rotation 93.67 s<sup>-1</sup>.

Basic winding data: stator active resistance 0.00419 Ohm; stator reactance 0.0879 Ohm; rotor reduced active resistance 0.0359 Ohm; rotor reduced reactance 0.1319 Ohm; resistance reduction factor 34.336; magnetizing reactance 1.503 ohms.

The numerical values of the significantly influencing dimensionless parameters of the project under consideration, calculated according to the above ratios, are presented in the corresponding column in Table 1.

The results of calculations, according to the relations (17)-(21) of the selected indicators of the quality of the maneuver, are given in Table 2.

Table 2

**The main indicators of the quality of the maneuver**

Quality indicators	Analytical dependencies	Exact method	Error, %
1. Circulation time – $T_{man}$	20,5	22,521	9,8
2. Evolutionary period of circulation – $T_{ev}$	13	13,388	3
3. Fuel costs for the maneuver – $G_{man}$	30,5	31	1,5
4. Reducing the speed of the vessel on the circulation – $\Delta$	0,55	0,455	17,3
5. Relative circulation diameter – $D_{cir}$	3,75	4,13	10

Calculations of these indicators, performed using a complete mathematical model, gave the results presented in the corresponding column of Table 2. It also shows the error in the results obtained from analytical dependencies compared to those obtained from the full mathematical model.

The given example clearly illustrates the possibilities of using the theory of dynamic similarity in solving problems of analyzing the dynamics of electric ships' propulsion complexes. In particular, by calculating the basic dynamic similarity criteria and dimensionless parameters of the complex by the simplest ratios, it is possible to estimate in the first approximation the quality indicators of maneuvering of electric ships' propulsion complexes.

The use of the concepts of dynamic similarity makes it possible not only to evaluate the main quality indicators of the maneuver execution, but also to find possible ways to improve them. Let us illustrate these possibilities by the example of the analysis of quality indicators characterizing the behavior of an electric power plant during the maneuver "acceleration of the vessel – entry into circulation".

As the main indicators for this maneuver, the following corresponding analytical dependencies were selected and obtained:

– relative change in the angular velocity of rotation of propulsion motors and propellers

$$\omega\Delta_M = 0,076 - 0,051N_X - 0,029C_{M16} - 0,004C_{61} + 0,006C_{\lambda 21} + 0,004C_{RY+} + 0,016N_X C_{M16}; \quad (22)$$

– relative change in heat engine power

$$\Delta P_D = 0,227 - 0,129N_X + 0,131C_{M16} - 0,026C_{22} - 0,118N_X C_{M16} - 0,026C_{M16} C_{65} - 0,02C_{M16} C_{61} + 0,014C_{21} C_{65} + 0,015C_{21} C_{61} - 0,015C_{21} C_{\lambda 21} + 0,016C_{65} C_{61} - 0,014C_{65} C_{\lambda 21} - 0,014C_{61} C_{\lambda 21}; \quad (23)$$

– relative change in propulsion motor current

$$\Delta I_M = 0,205 - 0,138N_X + 0,116C_{M16} - 0,012C_{65} - 0,011C_{61} - 0,013C_{\lambda 21} - 0,09N_X C_{M16} - 0,011C_{22}; \quad (24)$$

– relative change in propulsion motor torque

$$\Delta M_M = 0,147 - 0,097N_X + 0,121C_{M16} - 0,01C_{65} - 0,008C_{61} + 0,009C_{\lambda 21} - 0,01C_{22} - 0,088N_X C_{M16}. \quad (25)$$

When comparing the last three indicators, attention is drawn to the identity of the nature of the dependence of  $\Delta P_D$ ,  $\Delta I_M$  and  $\Delta M_M$  indicators on the parameters of the complexes. This corresponds to the physical relationship of the processes occurring in the power plant – with an increase in the load on the propulsion motor  $M_M$ , the propulsion motor current  $I_M$  and the heat engine power  $P_D$  increase accordingly, and approximately equally. At the same time, the degree of an increase in the heat engine power – the “last” link in this power chain – begins to be more significantly affected by the effects of the parameter interactions that characterize the electric ship’s hull.

The main parameters affecting the performance of the power plant  $\Delta \omega_M$ ,  $\Delta P_D$ ,  $\Delta I_M$ ,  $\Delta M_M$  are the power-to-weight ratio of the  $N_X$  electric ship (contribution – 27...67%), and the dimensionless parameter of propulsion motors –  $C_{M16}$  (contribution 16...83%). In addition to them, these indicators are significantly affected by the parameters determined by the coefficients of the hydrodynamic forces of resistance to the movement of the ship  $C_{22}$ ,  $C_{61}$  and  $C_{65}$ . Basically, the quality indicators of the M operation are linearly dependent on the parameters of the complexes. The performance of the other components of the complex is also significantly affected by the effects of parameter interactions, and these effects are commensurate with the influences of the parameters themselves.

### Conclusions.

1. The use of the theory of dynamic similarity helps to increase the efficiency of design processes and the results of the search for the best operating modes for electric ships’ propulsion complexes. The identification of dynamic similarity criteria and generalized dimensionless parameters of propulsion complexes makes it possible to cover a large class of ships with research. It seems possible to level the influence of inaccuracies in the assessment of external factors on the regime indicators of the complex.

2. Opportunities are opening up to generalize the results of research. Complexes with equal values of similarity criteria and generalized parameters will have the same laws of change in regime indicators and equal values of performance indicators. The identification of significant parameters and significant interaction effects allows reducing the number of necessary experiments by a factor of ten in the course of further research. Visualization appears in assessing the influence of one or another parameter on regime indicators, and also the perception of the physical nature of the processes under study is facilitated.

3. The transition to generalized dimensionless parameters makes it possible to carry out parametric optimization and search for optimal control laws for propulsion systems during maneuvers. This contributes to the construction of electric ships with predictable maneuvering properties.

### REFERENCES

1. Hansen J. F. Modeling and Control of Marine power System: Thesis for the Degree of Philosophy Doctor / J. F. Hansen. Norwegian University of Science and Technology, 2008. 119 p.
2. Radan D. Integrated Control of Marine Electrical Power System: Thesis for the Degree of Philosophy Doctor / D. Radan. Norwegian University of Science and Technology, 2008. 231 p.
3. Yukun Feng, Zuogang Chen, Yi Dai, Ping Wang. An experimental and numerical investigation on hydrodynamic characteristics of the bow thruster. *Ocean Engineering*, 2020, vol. 209(8):107348. doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107348.
4. Teresa Abramowicz-Gerigk, Mirosław K. Gerigk. Experimental study on the selected aspects of bow thruster generated flow field at ship zero-speed conditions. *Ocean Engineering*, 2020, vol. 209(92):107463. doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107463.
5. Liu Hui, Feng Yukun, Chen Zuogang, Dai Yi, Tian Ximin. Numerical Study of Pressure Fluctuation for Bow Thruster. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2017, vol. 51(3), pp. 294-299. doi: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2017.03.007.
6. Ionut Cristian Scurtu, Valentin Oncica. Combined CFX and Structural Simulation for Bow Thrusters Loading under Operating Conditions. *Journal of Physics Conference Series*, 2018, vol. 1122(1):012024. doi: 10.1088/1742-6596/1122/1/012024.
7. Sardono Sarwito, Semin Semin, Muhammad Badrus Zaman, Kamarul Hawari Ghazali. Unbalanced Voltages of Bow Thruster Motor Performance in the Ship Using Simulation. *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 2021, vol. 16(5):455. doi: 10.15866/iree.v16i5.18132.
8. O. Kupraty. Mathematical modelling of construction of ship turning trajectory using autonomous bow thruster work and research of bow thruster control specifics. *Scientific Journal of Gdynia Maritime University*, No. 118, June 2021, pp. 7-23. doi: 10.26408/118.01.
9. Andrzej Kopczyński. Hybrid expert system for computer-aided design of ship thruster subsystems. *IEEE Access*, Volume 8, 2020. doi:10.1109/ACCESS.2020.2982264.
10. Ruth, E. Propulsion Control and Thrust Allocation on Marine Vessels. Ph.D. Thesis, NTNU Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2008. 222 p.
11. Jarosław Artyszuk and Paweł Zalewski. Energy Savings by Optimization of Thrusters Allocation during Complex Ship Manoeuvres. *Energies* 2021, 14(16), 4959; doi:10.3390/en14164959.
12. Яровенко В. А. Расчет и оптимизация переходных режимов пропульсивных комплексов электроходов. Одесса: «Маяк», 1999. 188 с.
13. Небеснов В. И. Вопросы совместной работы двигателей, винтов, и корпуса судна. *Судостроение*, 1965. 247 с.

14. Яровенко В.А., Черников П.С. Метод расчета переходных режимов гребных электроэнергетических установок электроходов. *Електротехніка і електромеханіка*, 2017, № 6, С. 32-41. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.05.
15. Яровенко В.А., Зарицкая Е.И. Способ оценки нагрузок на гребные электрические установки электроходов при циркуляционном движении *Вісник Одеського державного морського університету*. – Одеса: ОНМУ. 2014. № 1(40). С. 89-103.

#### REFERENCES

1. Hansen J. F. (2008). Modeling and Control of Marine power System: Thesis for the Degree of Philosophy Doctor / J. F. Hansen. Norwegian University of Science and Technology. 119 p.
2. Radan D. (2008). Integrated Control of Marine Electrical Power System: Thesis for the Degree of Philosophy Doctor / D. Radan. Norwegian University of Science and Technology. 231 p.
3. Yukun Feng, Zuogang Chen, Yi Dai, Ping Wang. (2020). An experimental and numerical investigation on hydrodynamic characteristics of the bow thruster. *Ocean Engineering*, vol. 209(8):107348. doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107348.
4. Teresa Abramowicz-Gerigk, Mirosław K. Gerigk. (2020). Experimental study on the selected aspects of bow thruster generated flow field at ship zero-speed conditions. *Ocean Engineering*, vol. 209(92):107463. doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107463.
5. Liu Hui, Feng Yukun, Chen Zuogang, Dai Yi, Tian Ximin. (2017). Numerical Study of Pressure Fluctuation for Bow Thruster. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, vol. 51(3), pp.294-299. doi: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2017.03.007.
6. Ionut Cristian Scurtu, Valentin Oncica. (2018). Combined CFX and Structural Simulation for Bow Thrusters Loading under Operating Conditions. *Journal of Physics Conference Series*, vol. 1122(1):012024. doi: 10.1088/1742-6596/1122/1/012024.
7. Sardono Sarwito, Semin Semin, Muhammad Badrus Zaman, Kamarul Hawari Ghazali. (2021). Unbalanced Voltages of Bow Thruster Motor Performance in the Ship Using Simulation. *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, vol. 16(5):455. doi: 10.15866/iree.v16i5.18132.
8. O. Kupraty. (2021 June). Mathematical modelling of construction of ship turning trajectory using autonomous bow thruster work and research of bow thruster control specifics. *Scientific Journal of Gdynia Maritime University*, No. 118, pp. 7-23. doi: 10.26408/118.01.
9. Andrzej Kopczyński. (2020). Hybrid expert system for computer-aided design of ship thruster subsystems. *IEEE Access*, Volume 8, doi:10.1109/ACCESS.2020.2982264.

10. Ruth, E. (2008). Propulsion Control and Thrust Allocation on Marine Vessels. PhD. Thesis, NTNU Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway. 222 p.
11. Jarosław Artyszuk and Paweł Zalewski. (2021). Energy Savings by Optimization of Thrusters Allocation during Complex Ship Manoeuvres. *Energies*, 14(16), 4959; doi:10.3390/en14164959.
12. Yarovenko V.A. (1999). Calculation and optimization of transient regimes of propulsion complexes of electric vessels. [Raschet i optimizatsiia perekhodnykh rezhimov propul'sivnykh kompleksov elektrokhodov]. Odessa: Mayak Publ. 188 p. [in Ukrainian].
13. Nebesnov V.I. (1965). Questions of the joint operation of engines, propellers, and hull of the vessel [Voprosy sovmestnoi raboty dvigatelei, vintov, i korpusa sudna]. *Shipbuilding Publ.*, 247 p. [in Ukrainian].
14. Yarovenko V.A., Chernikov P.S. (2017). A calculation method of transient modes of electric ships' propelling electric plants. [Metod rascheta perekhodnykh rezhimov grebnykh elektroenergeticheskikh ustanovok elektrokhodov]. *Electrical engineering & electromechanics*, no. 6, pp. 32-41. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.05. [in Ukrainian].
15. Yarovenko V.A., Zarickaya E.I. (2014). A method for assessing loads on propulsion electric installations of electric ships during circulation motion. [Sposob ocenki nagruzok na grebnye elektricheskie ustanovki elektrokhodov pri cirkulyacionnom dvizhenii]. *Visnik Odeskogo derzhavnogo morskogo universitetu*. Odesa: ONMU. № 1(40). P. 89-103. [in Ukrainian].

## ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІРНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ ПАСАЖИРСЬКИХ СУДЕН З УРАХУВАННЯМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

**О.М. Шумило**

к.т.н., професор кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація»,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0003-0574-1954

### **Анотація**

*Екологічність будь-якого виробництва – сучасна вимога, яка, у тому числі, стосується морського судноплавства. Коефіцієнт енергоефективності EEDI є показником, який оцінює співвідношення шкоди навколишньому середовищу та роботи, яку виконує судно. Діюча нормативна база ІМО у сфері міжнародного судноплавства спрямована на забезпечення поступового зниження даного показника, що у комплексі забезпечить технологічно можливу мінімізацію екологічного впливу морського судноплавства.*

*Один з варіантів забезпечення допустимого рівня EEDI є модернізація, у тому числі, розмірна, за результатами якої збільшується GT судна, а це, в свою чергу, підвищує обсяг транспортної роботи судна та зменшує відповідний рівень EEDI.*

*У роботі проведено аналіз енергоефективності суден провідних світових компаній, який можна застосовувати для визначення їх модернізаційної привабливості. Запропоновано модель оптимізації розмірної модернізації пасажирського судна з визначенням довжини додаткової секції в районі мідель-шпангоуту судна при інтегральному розгляді економічних та екологічних аспектів подальшої експлуатації даного судна. Виконано експериментальна перевірка моделі, яка обґрунтувала її достовірність та придатність для практичного використання у процесах прийняття рішень щодо розмірної модернізації пасажирських суден.*

**Ключові слова:** коефіцієнт енергоефективності, математична модель, оптимізація, модернізації, екологічність.

## OPTIMIZATION OF PASSENGER VESSELS DIMENSIONAL MODERNIZATION TAKING INTO ACCOUNT THE ENERGY EFFICIENCY

**O.M. Shumylo**

PhD, Associate Professor at the Department  
“Ship Power Plants and Technical Operation”,  
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0003-0574-1954

### **Summary**

*The environmental friendliness of any production is a modern requirement, which, among others, concerns the maritime shipping. The EEDI energy efficiency coefficient is an indicator that evaluates the ratio of the vessels' negative impact to the environment*

*and the vessel transport work. The current regulatory framework of the IMO in the field of international shipping is aimed at ensuring a gradual reduction of this indicator, what in the complex will ensure technologically possible minimization of the maritime shipping environmental impact.*

*One of the directions for ensuring the permissible level of EEDI is modernization, including dimensional modernization, as a result of which the GT of the vessel increases, and this, in turn, increases the volume of vessel transport work and reduces the corresponding level of EEDI.*

*The paper analyzes the energy efficiency of the world's leading cruise companies' vessels for determination their modernization attractiveness. An optimization model for the passenger vessel dimensional modernization for the determination of the additional section length in the middle frame area of the ship is proposed, based on an integral consideration of the economic and ecological aspects of the vessel further operation. An experimental study of the model was carried out and substantiated its reliability and suitability for practical use in decision-making processes regarding the passenger vessels dimensional modernization.*

**Key words:** *energy efficiency coefficient, mathematical model, optimization, modernization, environmental impact.*

**Постановка проблеми и огляд літератури.** Міжнародна морська організація (International maritime organization, далі ІМО) встановлює системні вимоги до забезпечення екологічності морських суден. Круїзні пасажирські лайнери займають серед них особливе місце, оскільки для них характерно значне споживання електроенергії, пару, холодної і гарячої води, генерація яких обумовлена використанням вуглеводного палива. Саме цей вид палива є основним джерелом забруднення атмосфери і збільшенням кількості парникових газів.

Проблеми захисту навколишнього середовища, з якими стикаються і борються людство на сучасному етапі свого розвитку, потребують системного і невідкладного вирішення. Зростання світової економіки обумовлює підвищення водотоннажності світового торговельного флоту – збільшення потужності енергоустановок і споживання палива, як результат – зростання викидів відпрацьованих газів.

Доля забруднення навколишнього середовища в світі, що припадає на судноплавство складає 3% на вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ), 15% оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ) і 13% оксидів сірки ( $\text{SO}_x$ ) [1].

До боротьби світового співтовариства з екологічними загрозами активно долучилась ІМО, яка прийняла ще в 1973 році Міжнародну конвенцію щодо запобігання забруднення з суден (The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL 73/78) [2] – головний нормативно-правовий документ, що регламентує процедури і правилами, пов'язані з захистом та ліквідацією забруднення морського середовища з різних джерел і встановлення відповідальності. Правила, які охоплюють різноманітні джерела забруднення з суден, містяться в шести додатках. Додаток VI встановлює щодо запобігання забруднення атмосфери з суден які набрали чинності з 01.01.2005 р. і закріплює правила обмеження і запобігання повітря в результаті викидів оксиду сірки, азоту та інших шкідливих викидів, включаючи тверді частинки.

За останні двадцять років людство стикається з ще однією небезпечною загрозою – кліматичні зміни, стале підвищення температури планети, які викликані техногенними факторами різнобічної діяльності людини. Морська спільнота за лідерством ІМО не залишається в стороні від вирішення цих викликів: було прийнято відповідне рішення комітету ІМО по захисту морського середовища (MEPS – The Marine Environment Protection Committee), яке оформлене у вигляді резолюції MEPS.203 (63). Згідно цієї резолюції конвенція MARPOL 73/78 15.07.2011 була доповнена розділом IV, до складу якого було додано правило 19 – застосування; правило 20 – досягнутий коефіцієнт енергоефективності EEDI (Energy Efficiency Design Index); правило 21 – необхідний (потрібний, допустимий) коефіцієнт енергоефективності EEDI; правило 22 – план управління енергоефективності (Ship Energy Management plan, SEEMP); правило 23 – сприяння технічному співробітництву і передачі технологій (Promotion of technical cooperation and technology transfer) [3].

Основні положення щодо структури, формули та практичних аспектів застосування EEDI наведено у нормативних документах [4-11], що у сукупності створюють нормативну базу для впровадження та подальших досліджень питань енергоефективності суден. З урахуванням технологічних та технічних особливостей різних за спеціалізацією суден слід відзначити низку робіт, у яких розглядалися варіанти трансформації базової формули EEDI. Так, у [12] обґрунтовано модифікований варіант формули EEDI з урахуванням специфіки суден-контейнеровозів, у [13] – теж саме для пасажирських Ро-Ро. Особливості застосування EEDI для нових суден викладено у [14].

Окремі питання впливу судноплавства в загалі та конкретного судна на навколишнє середовище у контексті EEDI проаналізовано у [15-22]. Наприклад, у [16] проаналізовано вплив швидкості судна EEDI, у [20] враховано вплив навігаційних умов на рівень EEDI, шляхи зменшення EEDI охарактеризовано у [21].

Тем не менш, практично не розглянуто у сучасній науковій літературі питання зменшення EEDI у результаті модернізації суден, а це є один з головних критеріїв модернізації.

Розмірна модернізація пасажирських суден, як правило, розглядається виключно або з технічних позицій (наприклад, роботи [23,24]), або аналізується як комерційний проєкт ([25]) з приводу його економічної ефективності для замовника модернізації. Тем не менш, саме інтегральне врахування комплексу технологічних, економічних та екологічних умов відповідає сучасному підходу до реалізації будь-яких проєктів. Таким чином, розмірна модернізація пасажирських (як будь-яких інших) суден має забезпечувати необхідні рівень екологічності, що враховується за допомогою EEDI – тобто співвідношення «шкода довікллю – корисна робота судна» повинно не перевищувати припустимий рівень. Все вищевикладене обумовлює актуальність даного дослідження.

**Мета дослідження.** Метою дослідження є розробка моделі оптимізації розмірної модернізації пасажирських суден з урахуванням енергоефективності, тобто моделі, яка забезпечує інтегральний розгляд економічних та екологічних аспектів.

Досягнення мети базується на послідовному розгляді наступних питань:

- 1) дослідження EEDI для пасажирських суден провідних світових компаній в сфері круїзного бізнесу;
- 2) розробка математичної моделі для визначення оптимального проведення розмірної модернізації (конверсії) пасажирських лайнерів;
- 3) експериментальні дослідження моделі.

### **Визначення та дослідження енергоефективності пасажирських суден.**

Коефіцієнт енергоефективності EEDI покликаний стимулювати використання двигунів, установок і обладнання, що в меншій мірі забруднюють довкілля (тобто більш енергоефективних). З 01 січня 2013 р., після початкового етапу, що розпочався з 01 липня 2011 року, що проектується повинно мати енергоефективність, визначену коефіцієнтом EEDI, що повинна не перевищувати допустимий (граничний, еталонний) рівень енергоефективності. Цей рівень повинен підвищуватись кожні п'ять років, що ставить за мету запроваджувати нововведення, винаходи, останні дослідження науково-технічного прогресу в галузі морської інженерії, які здійснюють вплив на ефективність використання палива, починаючи зі стадії проектування судна.

Як відомо, EEDI являє собою визначене значення для конкретного проекту судна, яке розраховується в грамах діоксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) у відношенні місткості судна на морську милю – найменше значення EEDI характеризує судно як більш енергоефективне. Рівень скорочення викидів  $\text{CO}_2$  (г/тона-миль) для першого етапу (фази) установлено на рівня 10% і буде посилено кожні п'ять років, щоб відповідати сучасному рівню розвитку техніки щодо підвищення енергоефективності і скорочення викидів.

Зменшення значень коефіцієнтів EEDI були встановлені на період до 2025 року і далі, коли для визначених типів суден скорочення передбачено на 30%, яке розраховується на основі контрольної (еталонної) лінії, що являє собою середню ефективність для суден, які побудовані в період 2000 по 2010 роки. Коефіцієнт EEDI було розроблено для найбільших і найенергоємніших сегментів світової торговельного флоту і охоплює наступні типи суден: танкери, балкери, газозови, універсальні судна, контейнеровози, рефрижераторні і комбіновані судна. В 2014 році МЕРС прийняв поправки до правил для визначення EEDI, щоб розширити сферу дії цього коефіцієнту на: газозови, Ро-Ро, пасажирські судна. Ці поправки означали, що типи суден, які відповідають за 85% викидів  $\text{CO}_2$  світового судноплавства, включені в міжнародний режим регулювання.

З 2012 р. Комітетом по захисту морського судноплавства (МЕРС) прийнято поправки в наступні керівні документи, зосереджених на реалізацію обов'язкових правил з забезпечення енергоефективності суден в додатку VI до конвенції MARPOL 73/78 [2-10]:

- 2014, Керівництво щодо обстеження та сертифікації індексу проектування енергоефективності EEDI зі змінами;
- 2014, Керівництво щодо методу розрахунку досягнутого (допустимого) індексу енергоефективності для нових суден зі змінами;
- 2013, Керівництво щодо розрахунку допустимих (референтних) ліній для визначення коефіцієнтів енергоефективності EEDI;
- 2013, Керівництво щодо розрахунку допустимих (референтних) ліній для використання з індексом проектування енергоефективності для крупних пасажирських суден з традиційною силовою установкою;
- 2013, Тимчасові рекомендації визначення мінімальної потужності руху в несприятливих умовах;
- 2016, Керівництво з розробки плану управління енергоефективністю судна (ship energy efficient management plan, SEEMP);

– 2013, Керівництво з використання інноваційних технологій щодо забезпечення енергоефективності досягнутого (проектного) EEDI суден.

Енергоефективність морських суден завжди грала ключову роль в процесі проектування, побудови, експлуатації і модернізації. Яку традиційно визначали коефіцієнтом корисної дії або витратою палива, хоча ефективність витрати палива і визначається к.к.д. Ці величини відіграють фундаментальну роль у визначенні енергетичної і економічної ефективності, але не дозволяють визначити вплив парникових газів, і насамперед діоксиду вуглецю CO<sub>2</sub>.

Таким чином, перед світовим співтовариством постає суттєва дилема: перша – необхідність забезпечити зростання глобальної економіки, що нерозривно пов'язано зі зростання водотоннажності світового флоту і, як наслідок збільшенням потужності суднових енергетичних установок, друга – зменшити вплив парникових газів, насамперед CO<sub>2</sub>, при забезпеченні зростання економіки. Іншими словами, потрібно встановити відповідний критерій, що вимірюється в умовних координатах «школа-користь». Такий критерій було запропоновано ІМО – це коефіцієнт енергоефективності суден EEDI і надані рекомендації щодо його кількісного визначення. Основний сенс формули, що запропонована для оцінки негативного впливу – шкода визначається масою CO<sub>2</sub>, користь – масою вантажу помноженою на відстань його доставки [11]:

$$EEDI = \frac{\text{маса } CO_2}{\text{маса вантажу} \cdot \text{відстань}} \quad (1)$$

Правило 20 розділу Додатка IV Конвенції MARPOL 73/78 у відповідності до резолюції 203 (62) Комітету з безпеки на морі встановлює норми при: визначенні розрахункового коефіцієнту EEDI; для всіх нових суден, контракт на будівництво якого укладено на 01 липня або на суттєву його модернізацію.

Значення коефіцієнта EEDI повинно бути визначено для кожного судна, що відображається у відповідних супроводжувальних документах.

Розрахунковий коефіцієнт EEDI визначається у відповідності до керівництва схваленого резолюцією комітету по захисту морського середовища MEPS. 245 (66), згідно з яким розрахункова формула EEDI має вигляд [11]:

$$EEDI = \frac{\left( \prod_{j=1}^M f_j \right) \left( \sum_{i=1}^{nME} P_{ME_i} \cdot C_{FME_i} \cdot SFC_{ME_i} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot f_c \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} + \frac{\left( \prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nRTI} P_{RTI_i} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff_i} \cdot P_{AE_{eff_i}} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} - \left( \sum_{i=1}^{neff} f_{eff_i} \cdot P_{eff_i} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)}{f_i \cdot f_c \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} \quad (2)$$

де  $SFC_{ME}$ ,  $SFC_{AE}$  – питома ефективна головних (індекс ME), допоміжних двигунів (індекс AE), г/(кВт/год);

$Capacity$  – фактор, що визначається наступним чином: для суховантажів, наливних суден, газозовів, вантажних суден типу Ro-Ro, універсальних суден для перевезення генеральних вантажів приймається рівною дедвейту, т; для пасажирських суден, в тому числі вантажопасажирські пороми приймаються рівною валовій місткості судна, т; для контейнерних суден – 70% від дедвейту;

$C_{FME_i}, C_{FAE}, C_{FME}$  – коефіцієнти кореляції (безрозмірні) між витратою палива і кількістю оксиду вуглецю  $C_{O_2}$ , що утворюються при згорянні відповідного виду палива в дизелі, який визначається вмістом вуглецю;

$V_{ref}$  – швидкість судна, що забезпечується максимально допустимою пропульсивною потужністю двигунів, вузли;

$P_{ME_i}$  – потужність приймається рівною 75% від номінальної встановленої потужності кожного головного двигуна ( $i$ -го) після вирахування потужності, що підводиться до валогенераторів ( $P_{PTO_i}$ ), кВт;

$P_{RTI}$  – потужність визначається лише у разі наявності пристроїв проведення додаткової потужності до валопроводів (окрім головних двигунів), що входять до складу пропульсивного комплексу, кВт;

$P_{eff_i}$  – потужність приймається рівною 75% від потужності виробленої з використанням інноваційних технологій (без використання палив) та враховується до загальної пропульсивної потужності, кВт;

$P_{AEff_i}$  – потужність, що складає 75% від потужності допоміжних двигунів в результаті використання інноваційних технологій для зменшення витрат палива дизель-генераторів, кВт;

$f_j$  – сумарна потужність допоміжних двигунів, необхідна для забезпечення всіх споживачів електричною енергією на ходовому режимі, кВт;

$f_j$  – поправочний коефіцієнт, що враховує специфічні конструктивні елементи судна;

$f_i$  – коефіцієнт, що враховує необхідність (технічних і правових) обмежень дедвейту і розраховується за рівняннями для суден льодового класу;

$f_{eff_i}$  – коефіцієнт, що враховує впровадження і застосування на судні відповідних енергоефективних технологій;

$f_c$  – коефіцієнт, що враховує валовий обсяг вантажних приміщень;

$f_w$  – хвильовий коефіцієнт, що враховує зменшення швидкості руху судна при погіршенні метеорологічних умов.

Формула (2) носить універсальний характер для всіх типів суден. Сучасні круїзні лайнери, які застосовують пропульсивні установки з електричними приводами, обладнаними синхронними двигунами, мають об'єднану енергосистему, генератори (дизельні або турбінні) якої здійснюють живлення тягових двигунів, допоміжних загальносуднових механізмів і спеціальних систем, орієнтованих на забезпечення пасажирів. Таким чином формула (2) може бути перетворена і подана у наступному вигляді:

$$EEDI = \frac{\left( \prod_{j=1}^M f_j \right) \left( \sum_{i=1}^{n_{DG}} P_{DG_i} C_{FDG_i} SFC_{DG_i} \right)}{f_i f_c f_l GT f_w V_{ref}} - \frac{\left( \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff_i} P_{DG_{eff_i}} \right) C_{FDG_i} SFC_{DG_i}}{f_i f_c f_l GT f_w V_{ref}} - \frac{\left( \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff_i} P_{eff_i} C_{FDG_i} SFC_{DG_i} \right)}{f_i f_c f_l GT f_w V_{ref}} \quad (3)$$

де  $n_{DG}$  – число дизель-генераторів;

$\sum_{i=1}^{n_{DG}} P_{DG_i}$  – фактична сумарна експлуатаційна потужність дизель-генераторів, кВт;

$$\sum_{i=1}^{n_{DG}} P_{DG_i} = 0,75 MCR_{DG}$$

$C_{FDG_i}, C_{FDG}$  – коефіцієнти кореляції (безрозмірні) між витратою палива і кількістю оксиду вуглецю  $C_{O_2}$ , що утворюються при згорянні відповідного виду палива в дизелі, який визначається вмістом вуглецю;

$SFC_{DG_i}$  – питома ефективна для дизель-генераторів, г/(кВт/год);

$P_{DG_{eff_i}}$  – потужність, яка генерується з застосуванням енергії відпрацьованих газів дизель-генераторів;

$P_{eff_i}$  – потужність, яка виробляється інноваційними енергоефективними пристроями, і використовується для зменшення потужності дизель-генераторів, кВт.

У відповідності до правила 21 було введено поняття як граничне (обов'язкове, обмежувальне) значення коефіцієнту (required EEDI), яке розповсюджуються на всі нові судна та судна, що провели глибоку модернізацію, тому це дало можливість морським адміністраціям розглядати їх як нові судна. Згідно з цим правилом умова яка повинна виконуватись при проектуванні і модернізації суден:

$$EEDI \leq [EEDI], \quad (4)$$

де  $EEDI$  – розрахункове (досягнуте, attained) значення коефіцієнта енергоефективності;  $[EEDI]$  – допустиме (required), граничне значення коефіцієнта енергоефективності.

Під егідою Міжнародної морської організації було проведено комплексні дослідження, на базі отриманих результатів яких запропоновано визначати коефіцієнт EEDI у вигляді графічної функції залежності цього коефіцієнту від дедвейту або грощ тону (gross tonnage GT), які рекомендовано зображати у вигляді еталонних ліній (reference lines) для різних типів суден (суховантажів, балкерів, танкерів, газозовів, контейнеровозів та інше). Резолюція 231 (65) Комітету по захисту навколишнього середовища (MEPC) затвердила «Керівництво з розрахунку еталонних ліній для використання при визначенні коефіцієнту енергоефективності». Еталонна лінія (reference line) – це лінія, що являє собою усереднену криву, яка визначена за індивідуальними значеннями конкретної групи суден. За допомогою апроксимації сімейства EEDI кривих з використанням степеневої функції було отримано рівняння виду:

$$[EEDI] = a \cdot b^{-c}, \quad (5)$$

де  $a, c$  – коефіцієнти [2];

$b$  – аргумент функції, який має значення дедвейта  $DW$  для суховантажних, рефрижераторних суден, контейнеровозів, танкерів, балкерів, суден типу Ro-Ro і грощ тону  $GT$  для пасажирських суден. Для останніх рівняння (5) можна переписати у вигляді степеневої функції:

$$f(GT) = [EEDI] = a \cdot GT^{-c}, \quad (6)$$

де  $a=170,84, c=0,214$  – коефіцієнти, які отримані в результаті кореляційно-регресійного аналізу [2].

Рівняння (6) дозволяє побудувати обмежувальні криві на викиди  $CO_2$ . Правило 21 Додатку VI Конвенції MARPOL 73/78 вимагає від судновласників зменшувати

величину  $[EEDI]$  і положення обмежувальної кривої  $[EEDI] = (DWT, GT)$  кожні п'ять років на величину  $X$ , що вимірюється у відносних одиницях.

Для суден, перерахованих у Правилах 2.25-2.31, 2.33-2.35 і 2.39 передбачено збільшення вимог щодо обмежувальної кривої  $[EEDI]$ : по-етапного, кожні п'ять років зменшення  $[EEDI]$  на величину коефіцієнта  $X$ , що отримав назву коефіцієнта зменшення (reduction factor)  $[EEDI]_i = \left(1 - \frac{X_i}{100}\right)[EEDI]_{i-1}$ .

Для кожного етапу (фази) допустиме значення коефіцієнту  $[ ]$ :

$$\begin{cases} [EEDI]_{phase1} = \left(1 - \frac{X_{phase1}}{100}\right)[EEDI]_{phase0} \\ [EEDI]_{phase2} = \left(1 - \frac{X_{phase2}}{100}\right)[EEDI]_{phase1} \\ [EEDI]_{phase3} = \left(1 - \frac{X_{phase3}}{100}\right)[EEDI]_{phase2} \\ [EEDI]_{phase4} = \left(1 - \frac{X_{phase4}}{100}\right)[EEDI]_{phase3} \end{cases}, \quad (7)$$

Правило 21 встановлює вимоги щодо граничних значень етапів та темпів зменшення значення  $[EEDI]$ . Етапи (фази), які регламентуються цим правилом, мають наступну тривалість:

- початковий (phase 0) з 01.12.2013 до 31.12.2014;
- перший (phase 1) з 01.01.2015 до 31.12.2019;
- другий (phase 2) з 01.01.2020 до 31.12.2024;
- третій (phase 3) з 01.12.2025 і далі.

Рівняння (7) дає можливість побудувати сімейство граничних кривих кривих для кожного зі згаданих етапів.

В роботі [3] було здійснено аналіз факторів, що впливають на конкурентоздатність круїзних компаній, в якому, на жаль, не приділено уваги екологічній привабливості і, зокрема не враховано фактору ефективності використання палива і зменшення кількості парникових викидів. Цю місію виконує коефіцієнт енергоефективності, що в розглядається цій роботі. У зв'язку з чим виникла необхідність провести ґрунтовну оцінку відповідності значень коефіцієнтів  $EEDI$  суден провідних компаній, розрахованих за формулою (3), сучасним вимогам, що нормуються правилом 21 Додатку VI Конвенції MARPOL 73/78.

З метою визначення відповідності енергоефективності круїзних лайнерів найбільших світових компаній новітнім вимогам правила 21 Додатку VI Конвенції MARPOL 73/78 було проведено відповідний аналіз, що ґрунтувався на застосуванні рівнянь (4) і (7). На рис. 1 і 2 представлені результати таких розрахунків для лайнерів 16 найвідоміших круїзних компаній, де показано, що всі судна відповідають нормам енергоефективності для встановленого періоду введення до експлуатації. Зокрема, найбільший коефіцієнт  $EEDI$  мають судна: Queen Elizabeth (1965 р.) компанії Gunard Line, Amsterdam (2000 р.) компанії HOLLAND LINE, Oceania Regatta (1998 р.), Oceania Insignia (1998 р.), Oceania Nautica (1998 р.), Oceania Sirena (1998 р.), Oceania Riviera (1998 р.) компанії Oceania. В той же час слід підкреслити, що судна останніх років спорудження мають коефіцієнт  $EEDI$ ,

що значно менше ніж допустимі, регламентовані обмежувальною лінією і після 2025 року спорудження.

Необхідно зазначити, що низка суден, незважаючи на те, що вони споруджені біля двадцяти років тому, мають коефіцієнт енергоефективності  $EEDI$ , суттєво менший ніж вимоги правила 21 для третьої фази (при тому, що вона набирає чинності після 2025 р.). Мова йде про лайнери (рис.1 і рис.2): Carnival Miracle (2004) компанії Carnival, Queen Mary 2 (2003) компанії Cunard Line, Hamburg (1997), Deutschland (1988), Amadea (1991), Amera (2002) компанії PHOENIX, Seven Seas Voyager (2003) компанії Regent Seven Seas, Brilliance of the Seas (2002) компанії Royal Caribbean, Mein Schiff 1 (1996) компанії TUI.

Модернізація суден традиційно вважалась дуже ефективним інструментом підвищення конкурентоздатності судноплавних компаній, особливо тих, які займаються круїзним бізнесом. В роботі [3] проведено дослідження щодо визначення оптимальних розмірів подовження суден при проведенні розмірної модернізації. Саме такий вид переобладнання (конверсії) суден зі збільшенням розмірів відіграє особливу роль в проведенні модернізації, оскільки при цьому створюється нове судно, яке відрізняється від прототипу морехідними якостями, техніко-економічними, техніко-експлуатаційними і безпековими характеристиками.

Модель визначення оптимального розміру додаткової секції для модернізації пасажирського судна

Отже, модернізація пасажирських суден забезпечує більш високий рівень комфортабельності, і, яка наслідок, більш високий прибуток. Розмірна модернізація пасажирського судна передбачає не тільки підвищення комфортабельності судна, а, перш за все, підвищення розміру судна  $GT$ , та відповідної пасажиромісткості та зростання прибутку за рахунок не тільки підвищення статусу судна. Звичайно, що основною метою розмірної модернізації пасажирського судна є комерційна мета, тобто отримання підвищеного прибутку від експлуатації судна незалежно від форми цієї експлуатації. Тобто навіть якщо судновласник надає операторові це судно у тайм-чартерну оренду, то відповідна ставка  $F^{t-ch}(GT)$  залежить від розміру судна  $EEDI$ .

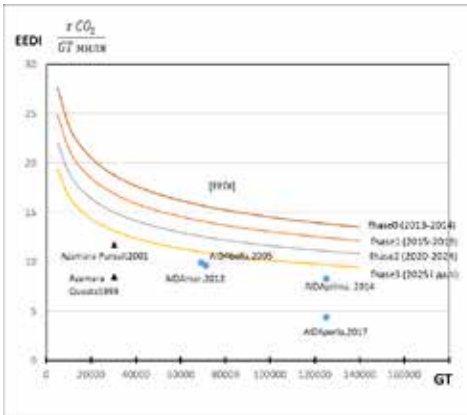
Але ж у сучасних умовах екологічні аспекти мають не менший пріоритет, ніж комерційні. З урахуванням зворотного зв'язку між коефіцієнтом енергоефективності  $EEDI$  та  $GT$ , розмірна модернізація передбачає й зменшення екологічного навантаження на зовнішнє середовище за рахунок збільшення знаменника у (5), але ж за умови, що використовуватимуться сучасні технології, які забезпечують вплив на коефіцієнт  $f_{eff}$ , а також за витрати палива.

Таким чином, економічні результати розмірної модернізації так саме як й екологічні, є функціями від розміру судна  $GT$ , а якщо точніше, від збільшення розміру судна на величину  $\Delta GT$ :  $Z(\Delta GT)$  характеризує залежність економічних результатів розмірної модернізації від збільшення розміру судна на  $\Delta GT$ ,  $EEDI(\Delta GT)$  – рівня енергоефективності від цієї ж величини.

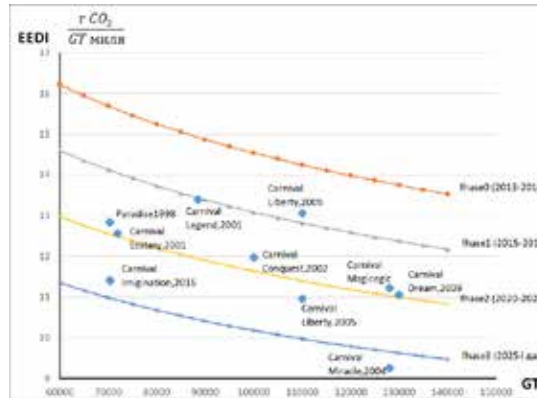
Збільшення розміру судна  $\Delta GT$  досягається за рахунок додаткової секції довжиною  $x > 0$ , яка для кожного конкретного судна з урахуванням його конструктивних особливостей обумовлює величину  $\Delta GT(x)$ , таким чином, й економічні показники, й коефіцієнт енергоефективності є функціями від  $x$ :

$$Z(\Delta GT) = Z(\Delta GT(x)) = Z(x) \quad (8)$$

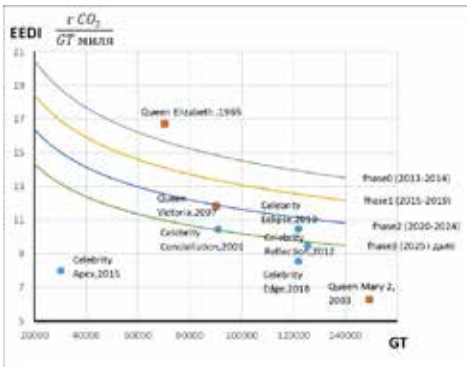
$$EEDI(\Delta GT) = EEDI(\Delta GT(x)) = EEDI(x) \quad (9)$$



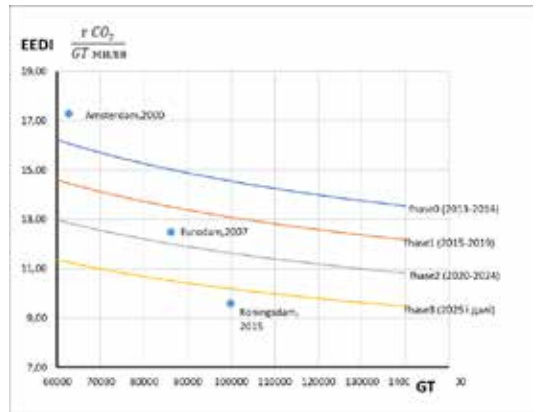
а



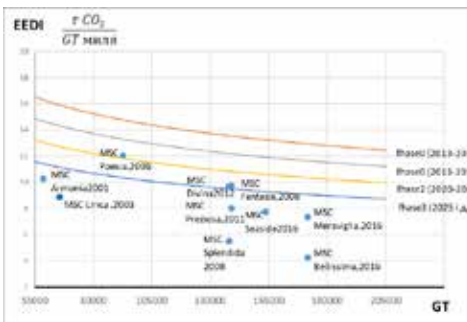
б



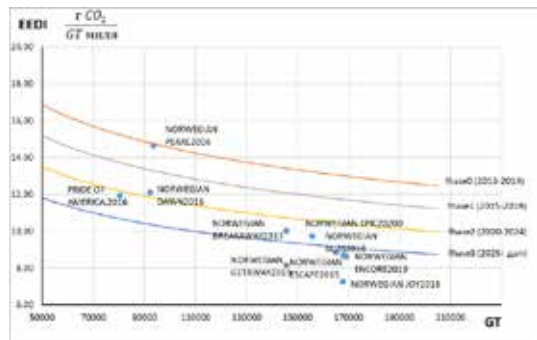
в



г

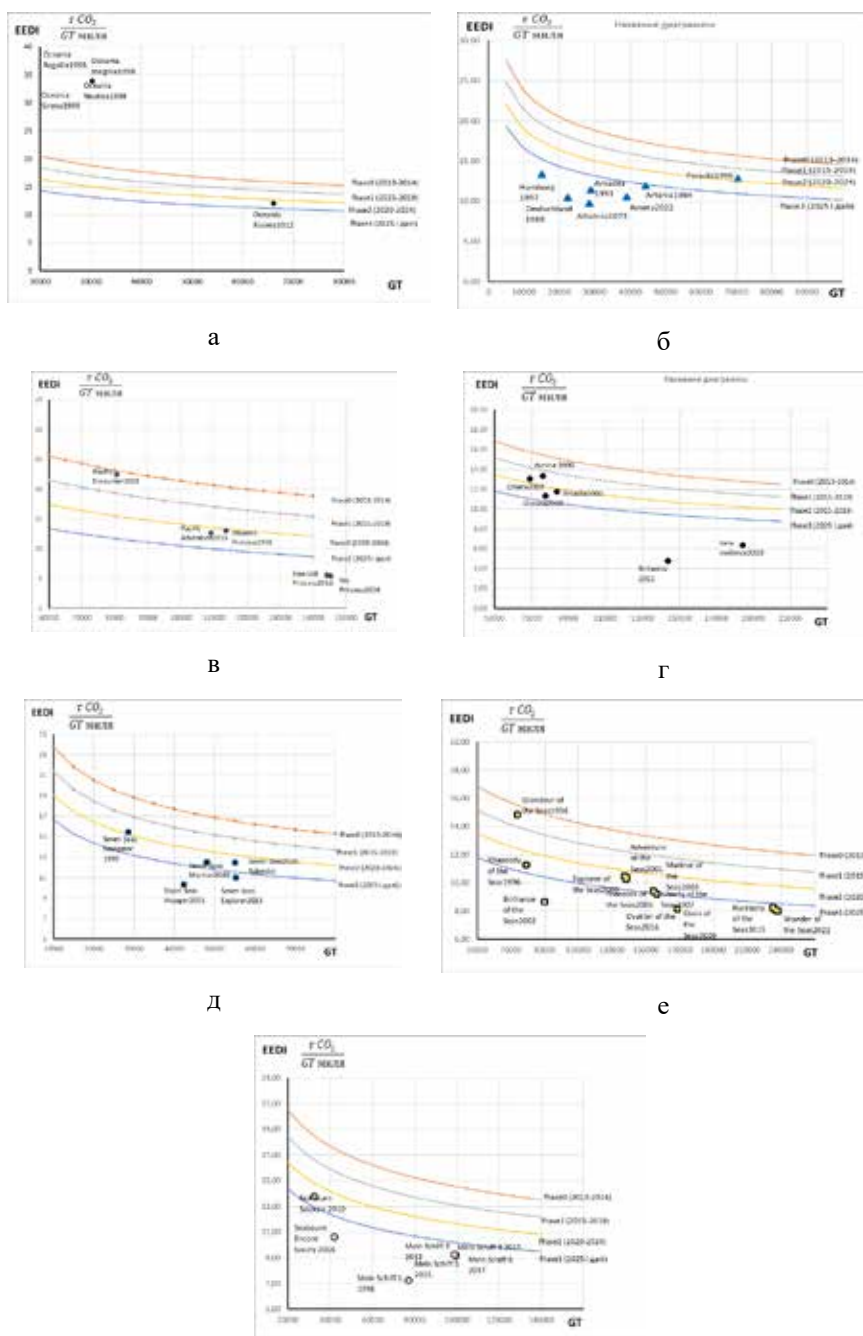


д



е

Рис. 1. Результати розрахунку коефіцієнтів енергоефективності і порівняння їх з еталонними кривими для круїзних суден компанії AZAMARA і AIDA (а), CARNIVAL (б), GUNARD LINE і CELEBRITY (в), HOLLAND LINE (г), MSC Cruises (д), NCL (е)



Ж

Рис. 2. Результати розрахунку коефіцієнтів енергоефективності і порівняння їх з еталонними кривими для круїзних суден компаній OCEANIA (а), PHOENIX (б), PRIENCES cruises (в), P&O (г), REGENT SEVEN SEAS (д), ROYAL CORIBBEAN (е), TUI та SEABOURN (ж)

З урахуванням викладеного вище пропонується при оптимізації розмірної модернізації пасажирських суден враховувати як економічні чинники, так й коефіцієнт енергоефективності, який, як і економічні показники, залежить від розміру додаткової секції судна  $\Delta GT$ . Такий інтегральний підхід дозволить врахувати багатоаспектність економіко-екологічних вимог щодо подальшої експлуатації суден після модернізації.

З урахуванням цільового використання додаткової секції, а саме, створення додаткових кают, необхідно врахувати «кратність» довжини додаткової секції довжині планованих кают  $n_c > 0$ , тобто:

$$\frac{x}{n_c} \in Z^+. \quad (10)$$

Така умова забезпечує комерційну доцільність кожного сантиметру додаткової секції. Варто відзначити, що  $x=0$  виключено із розгляду, що відповідає умові вже прийнятого рішення про збільшення розміру судна.

З іншого боку збільшення розміру судна має певні обмеження з точки зору конвенції MARPOL 73/78 [ ], тому введемо у розгляд  $l_s$  – допустиму довжину додаткової секції, що визначається з урахуванням вимог вказаної конвенції. Таким чином:

$$x \leq l_s. \quad (11)$$

Збільшення судна за рахунок додаткової секції пов'язано з витратами  $C(x)$  на проектування, на проведення модернізації  $g_1(x)$ , встановлення додаткового обладнання  $g_2(x)$ , забезпечення умов міцності корпусу  $R_m$ . Усі ці витрати, звичайно, обмежені можливостями фінансування розмірної модернізації  $R_m$ :

$$C(x) + g_1(x) + g_2(x) \leq R_m \quad (12)$$

В деяких випадках доцільно розглядати окремі обмеження по кожній позиції витрат, пов'язаних безпосередньо з реалізацією заходів з модернізації:

$$g_1(x) \leq R_1 \quad (13)$$

$$g_2(x) \leq R_2 \quad (14)$$

$$g_3(x) \leq R_3 \quad (15)$$

Проведення модернізації шляхом збільшення розміру судна за рахунок додаткової секції має своєю метою отримання судновласником додаткового прибутку протягом певного періоду часу. Як правило цей термін встановлюється у кожній ситуації окремо з урахуванням специфіки судна, його стану та інших факторів. Приймаємо у подальшому цей термін як  $T$ . Щорічний додатковий прибуток  $\Delta P^y(x)$  пов'язаний з використанням додаткових кают і в загальному вигляді може бути представлений як:

$$\Delta P^y(x) = (P_c + P_{ae}) \cdot N_d \cdot \frac{x}{n_c}, \quad (16)$$

де  $P_c$  – середній річний прибуток від однієї каюти певного класу (що передбачається модернізацією) пов'язаний з розміщенням пасажирів,  $P_{ae}$  – середній річний прибуток від кількості пасажирів, передбачених каютами, що розглядаються, пов'язаний з витратами на відпочинок протягом рейсу пасажирів на судні (ресторан, розваги, магазини, тощо);

$N_d$  – кількість палуб, на яких планується розташування кают у додатковій секції;

$N_d \cdot \frac{x}{n_c}$  – характеризує кількість кают у додатковій секції.

Таким чином, протягом прийнятого терміну розгляду  $T$  додатковий прибуток від збільшення розміру судна складає:

$$\Delta P(x) = T \cdot \Delta P^y(x) = T \cdot (P_c + P_{ae}) \cdot N_d \cdot \frac{x}{n_c}. \quad (17)$$

Збільшення розміру судна призводить до додаткових щорічних експлуатаційних витрат  $\Delta C_{op}^y(x)$ , наприклад, перш за все, за рахунок збільшення портових зборів та плат, які встановлюються саме за розміром судна (як правило, за NT та/або GT). Таким чином, за певний період часу додаткові експлуатаційні витрати складають:

$$\Delta C_{op}(\Delta GT(x)) = \Delta C_{op}(x) = T \cdot \Delta C_{op}^y(x). \quad (18)$$

Отже, прикінцевий економічний результат модернізації по збільшенню розміру пасажирського судна без врахування дисконтування може бути поданий у вигляді:

$$Z(x) = \Delta P(x) - \Delta C_{op}(x) - C(x) - g_1(x) - g_2(x) - g_3(x). \quad (19)$$

Тобто (19) формує баланс усіх потоків грошових коштів, які пов'язані саме з модернізацією. Саме цей вираз пропонується використовувати в якості критерію оптимізації:

$$Z(x) = \Delta P(x) - \Delta C_{op}(x) - C(x) - g_1(x) - g_2(x) - g_3(x) \rightarrow \max. \quad (20)$$

Параметр управління – змінна моделі – довжина додаткової секції  $x$ .

Слід відзначити, що максимальне значення (20) не обов'язково забезпечить необхідну ефективність судновласнику.

Тому слід врахувати дві умови: перша – це умова отримання судновласником щорічного додаткового прибутку на певному рівні, друга – це доцільність інвестиційних ресурсів, спрямованих на дану модернізацію. Зазначимо, що витрати (12) за своєю сутністю відносяться до інвестиційних витрат, тому економічна доцільність збільшення розміру судна має базуватися на їх врахуванні у вказаному сенсі.

Отже, щорічний прибуток від використання додаткових кают має забезпечувати заданий рівень  $\Delta P^{\min}$ :

$$\Delta P^y(x) - \Delta C_{op}^y(x) \geq \Delta P^{\min}. \quad (21)$$

Ефективність інвестицій може бути враховано за допомогою, наприклад, показника рентабельності інвестицій ROI:

$$\frac{\Delta P(x) - \Delta C_{op}(x)}{C(x) + g_1(x) + g_2(x) + g_3(x)} \geq ROI^{\min}, \quad (22)$$

де  $ROI^{\min}$  – мінімально припустимий рівень рентабельності (здається замовником модернізації). Так як  $x > 0$ , то знаменник у (20) теж більш 0.

Отже, (10)-(12), (20)-(22), формують основну структуру моделі для оптимізації розмірної оптимізації пасажирського судна. З урахуванням пропонованого підходу – інтегрального розгляду економічних на екологічних аспектів модернізації – доповним (10)-(12), (20)-(22) обмеженням на зміни у енергоефективності  $\Delta EEDI$ , які забезпечують виконання умов 3-ї фази (з 2025 року):

$$\Delta EEDI = [EEDI] - EEDI(x) > 0 \quad (23)$$

Відзначимо, що міжнародна морська організація регламентує норми енергоефективності не тільки для нових суден, але й до суден, що зазнали таких видів модернізації як переобладнання (конверсія) і модернізація СЕУ. Резолюціями комітету з безпеки на морі МЕРС 203.(62) і МЕРС 251.(66) було внесено відповідні поправки до розділів I і II конвенції MARPOL 73/78, в яких для суден, що пройшли модернізацію, визначаються додаткові вимоги щодо перерахунку коефіцієнту  $EEDI$  і порівнянні його з допустимим значенням  $[EEDI]$ .

З урахуванням викладеного вище:

$$\begin{aligned} \Delta EEDI(GT(x)) &= \Delta EEDI(x) = [EEDI] - EEDI(x) = \\ &= k^{3ph} \cdot 170,84 \cdot (GT * + \Delta GT(x))^{-0,214} - EEDI(x) \end{aligned} \quad (24)$$

де  $k^{3ph}$  – знижуючий коефіцієнт для 3-ої фази. Отже, для пасажирських суден від 85,000 GT  $k^{3ph} = 0,7$ , тобто базовий припустимий рівень енергоефективності зменшується на 30% ([ ]).

Таким чином, (23) набуває наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta EEDI(GT(x)) &= \Delta EEDI(x) = [EEDI] - EEDI(x) = \\ &= k^{3ph} \cdot 170,84 \cdot (GT * + \Delta GT(x))^{-0,214} - EEDI(x) > 0 \end{aligned} \quad (25)$$

де

$$\begin{aligned} EEDI(x) &= \frac{\left( \prod_{j=1}^M f_j \right) \left( \sum_{i=1}^{n_{DG}} P_{DG_i} C_{FDG_i} SFC_{DG_i} \right)}{f_i f_c f_l GT(x) f_w V_{ref}} - \\ &- \frac{\left( \left( \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff_i} P_{DG_{eff_i}} \right) C_{FDG_i} SFC_{DG_i} \right)}{f_i f_c f_l GT(x) f_w V_{ref}} - \\ &- \frac{\left( \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff_i} P_{eff_i} C_{FDG_i} SFC_{DG_i} \right)}{f_i f_c f_l GT(x) f_w V_{ref}} \end{aligned} \quad (24)$$

Дана модель дозволяє визначати оптимальний розмір додаткової секції пасажирського судна у процесі модернізації з урахуванням інтегрального підходу до розгляду економічних та екологічних аспектів подальшої експлуатації даного судна. Модель відноситься до класу нелінійних моделей – критерій оптимізації та більшість обмежень не є лінійними функціями.

Сутність критерію оптимізації – економічний результат модернізації для заданого періоду експлуатації судна після модернізації, обмеження враховують необхідність дотримання нормативних вимог до розміру додаткової секції та енергоефективності судна, а також можливі витрати на модернізацію.

#### Експериментальні дослідження моделі.

Для експериментальної перевірки моделі були прийняті функціональні залежності наближені до реальних даних (табл. 1).

Слід зазначити, що умова (10) передбачає кратність довжини додаткової секції довжині каюти (для прикладу прийнято 3,5 м). Але ж на практиці під час досліджень доцільним є розглядання такого обмеження як перевіркою умови після оптимізації. Наприклад, при оптимальній за усіма економічними, технологічними

та екологічними умовами довжині додаткової секції, але не кратної заданої величини, якщо відхилення складає припустиму довжину, то доцільним є корегування умов з довжині кают (якщо, наприклад, мова йде про 10-25 см).

Таблиця 1

**Прийняті функціональні залежності та вихідні дані**

Позначення	Прийняті значення чи залежності	Одиниці виміру
$\Delta P^{\min}$	1000	тис. дол
$ROI^{\min}$	1,1	-
$\Delta C_{op}^y(x)$	$500 \cdot x^{0,714}$	тис. дол.
$T$	10	роки
$n_c$	3,5	м
$l_c$	48	м
$C(x) + g_1(x) + g_2(x) + g_3(x)$	$1031 \cdot x^{0,928}$	тис. дол
$R_m$	10000	тис. дол
$EEDI(x)$	$86,7 \cdot x^{-0,868}$	
$\Delta P^y(x)$	$740 \cdot x^{0,824}$	тис. дол

У процесі експериментальних досліджень моделі змінювався рівень обмежень по фінансуванню розмірної модернізації  $R_m$  у межах 20000 тис. долл – 50000 тис. дол. Оптимальний розмір додаткової секції та основні характеристики результатів модернізації наведено у табл. 2.

Таблиця 2

**Варіанти оптимального рішення та відповідних показників розмірної модернізації для різних вихідних умов**

№	$R_m$	$x$	$Z(x)$	$\Delta EEDI$	$ROI$
1	50000	48	62942	7,58	2,68
2	30000	38	50709	7,05	2,69
3	20000	24	34010	5,57	2,7

Як бачимо, більш доцільним при розмірної модернізації є максимальна припустима її величина, тобто та, яка відповідає умовам діючих нормативних документів (варіант 2), саме цей варіант забезпечують максимальні значення як економічних показників, так й відстань між досягнутим за результатами розмірної модернізації EEDI та його припустимим значенням [EEDI].

Слід зазначити, що у даному конкретному прикладі «економічна ефективність» та «енергоефективність» оптимального рішення гармонічно доповнюють одна одну та не суперечать. Тобто забезпечення економічної ефективності відбувається разом із забезпеченням енергоефективності. Але ж умовою для цього є необхідний рівень фінансування модернізації, отже за умов недостатнього

рівня ресурсів економічні показники більш оптимістичні, ніж коефіцієнт енергоефективності.

Тем не менш необхідно підкреслити, що у експериментальних розрахунках не враховані можливі зміни у EEDI за рахунок, наприклад, змін у технологічному обладнанні судна на якісному рівні. Тобто у розрахунках враховано тільки вплив зміни розміру судна GT та, як наслідок, обсяг його транспортної роботи.

Подальші дослідження питання розмірної модернізації у контексті її впливу на екологічному рівні пов'язано саме с даними питаннями, що потребує значної кількості статистичних даних щодо шкоди довкіллю різними типами суднового обладнання.

**Висновки.** Екологічність будь-якого виробництва – сучасна вимога, яка, у тому числі, стосується морського судноплавства. Коефіцієнт енергоефективності EEDI є показником, який оцінює співвідношення шкоди навколишньому середовищу та роботи, яку виконує судно. Діюча нормативна база у сфері міжнародного судноплавства спрямована на забезпечення поступового зниження даного показника, що у комплексі забезпечить технологічно можливу мінімізацію екологічного впливу морського судноплавства.

Один з варіантів забезпечення допустимого рівня EEDI є модернізація, у тому числі, розмірна, за результатами якої збільшується GT судна, а це, в свою чергу, підвищує обсяг транспортної роботи судна та зменшує відповідний рівень EEDI.

У роботі проведено аналіз енергоефективності суден провідних світових компаній, який можна застосовувати для визначення їх модернізаційної привабливості; запропоновано модель оптимізації розмірної модернізації пасажирського судна з визначенням довжини додаткової секції судна при інтегральному розгляді економічних та екологічних аспектів подальшої експлуатації даного судна; виконано експериментальна перевірка моделі, яка обґрунтувала її достовірність та придатність для практичного використання у процесах прийняття рішень щодо розмірної модернізації пасажирських суден.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Global Forum on Transport and Environment in a Globalising World 10-12 November 2008, Guadalajara, Mexico The Environmental Impacts of Increased International Maritime Shipping. Oyvind Endresen and Magnus Eide, Det Norske Veritas, Høvik, Stig Dalsøren and Ivar S. Isaksen, University of Oslo and Eirik Sorgård, Pronord AS, Bodo, Norway. URL: <https://www.oecd.org/greengrowth/greening-transport/41373767.pdf>
2. Міжнародна конвенція щодо запобігання забруднення з суден 1973 року з поправками. URL: [Imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\)](http://Imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL)).
3. Резолюція комітету з захисту морського середовища Міжнародної морської організації 231(65). 2013 Guidelines for calculation of reference lines for use with the energy efficiency design index (EEDI) URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.231\(65\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.231(65).pdf)

4. Implementing Energy Efficiency Design Index (EEDI) <https://www.irclass.org/media/1393/energy-efficiency-design-index.pdf>
5. IMO (2010) “Module 2 – Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines”, IMO Train the Trainer (TTT) Course on Energy Efficient Ship Operation.
6. IMO (2014) “2014 Guidelines on the method of calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships”, MEPC 66/21/Add.1 p: 1.
7. IMO (2010) “Preventions of Air Pollution from Ships”, Marine Environment Protection Committee, 59th Session, Agenda item 4.
8. FaiC (2011) “IMO Technical Measures in Reducing Greenhouse Gas Emissions from ships: A Lloyd’s Register Perspective”, Lloyd’s Register Approach to IMO Technical Measures in Reducing Greenhouse Gas Emissions from Ships.
9. Energy Efficiency Design Index (EEDI) <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx>
10. MARPOL Annex VI, MEPC.1 / Circ.684. Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator (EEOI), 17 August 2009.
11. MEPC.1/Circ.815: 2013. Guidance on treatment of innovative energy efficiency technologies for calculation and verification of the attained EEDI for ships in adverse conditions.
12. Tokuslu, A. (2020). Analyzing the Energy Efficiency Design Index (EEDI) Performance of a Container Ship. *International Journal of Environment and Geoinformatics (IJEGEO)*, 7(2): 114-119. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.703255>
13. Ančić, Ivica & Sestan, Ante & Vladimir, Nikola. (2015). Modification of the EEDI for Ro-ro Passenger Ships. <https://doi.org/10.5957/WMTC-2015-053>
14. ICCT (2011) “The Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships”, Policy Update 15, October 3-2011.
15. Tran, Tien Anh. (2016). Calculation and Assessing the EEDI Index in the Field of Ship Energy Efficiency for M/V Jules Garnier. *Journal of Marine Science: Research & Development*. 06. <https://doi.org/10.4172/2155-9910.1000212> .
16. Psaraftis, Harilaos & Kontovas, Christos. (2014). Ship speed optimization: Concepts, models and combined speed-routing scenarios. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 44. 52–69. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.03.001> .
17. Haakont (2011) “Development of small versus large hydropower in Norway-comparision of environmental impacts”, *Energy Procedia* 20: 185-199.
18. Tu, H.; Yang, Y.; Zhang, L.; Xie, D.; Lyu, X.; Song, L.; Guan, Y.; Sun, J. A modified admiralty coefficient for estimating power curves in EEDI calculations. *Ocean Eng.* 2018, 150, 309–317
19. Ren H, Ding Y, Sui C. Influence of EEDI (Energy Efficiency Design Index) on Ship–Engine–Propeller Matching. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019; 7(12):425. <https://doi.org/10.3390/jmse7120425>

20. Yuan Y., Z. Li, R. Malekian, X. Yan (2017) Analysis of the operational ship energy efficiency considering navigation environmental impacts. *Journal of Marine Engineering & Technology* 16(3): 150-159. <https://doi.org/10.1080/20464177.2017.1307716> .
21. 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, 223-235. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.116.14>.
22. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Koryakin, K. (2021) Nature and origin of major security concerns and potential threats to the shipping industry. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 113, pp. 145–153 <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2021.113.11>
23. Гундобин А.А., Финкель Г.Н. Размерная модернизация и переоборудование судов: монография. Ленинград: Судостроение, 1977, 192 с.
24. Wolf, R., Dickman, J., & Boas, R. (2005). *Ship Design Using Heuristic Optimization Methods*. 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. <https://doi.org/10.2514/6.2005-1980>
25. Шумило О.М. Визначення оптимальних розмірів подовження пасажирських суден при їх модернізації. *Розвиток транспорту: Науковий журнал*. № 1 (12), 2022. С. 89-104.

#### REFERENCES

1. Global Forum on Transport and Environment in a Globalising World 10-12 November 2008, Guadalajara, Mexico The Environmental Impacts of Increased International Maritime Shipping. Oyvind Endresen and Magnus Eide, Det Norske Veritas, Høvik, Stig Dalsøren and Ivar S. Isaksen, University of Oslo and Eirik Sorgård, Pronord AS, Bodo, Norway. Retrieved from <https://www.oecd.org/green/growth/greening-transport/41373767.pdf>
2. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as amended [Mizhnarodna konventsiiia shchodo zapobihannia zabrudnennia z suden 1973 roku z popravkamy]. Retrieved from [imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\)](http://imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL)).
3. International Maritime Organization Marine Environment Protection Committee Resolution 231(65). [Rezoliutsiia komitetu z zakhystu morskoho seredovyscha Mizhnarodnoi morskoi orhanizatsii 231(65)]. (2013) Guidelines for calculation of reference lines for use with the energy efficiency design index (EEDI) Retrieved from [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.231\(65\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.231(65).pdf)
4. Implementing Energy Efficiency Design Index (EEDI) <https://www.irclass.org/media/1393/energy-efficiency-design-index.pdf>
5. IMO (2010) “Module 2 – Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines”, IMO Train the Trainer (TTT) Course on Energy Efficient Ship Operation.

6. IMO (2014) “2014 Guidelines on the method of calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships”, MEPC 66/21/Add.1 p: 1.
7. IMO (2010) “Preventions of Air Pollution from Ships”, Marine Environment Protection Committee, 59th Session, Agenda item 4.
8. FaiC (2011) “IMO Technical Measures in Reducing Greenhouse Gas Emissions from ships: A Lloyd’s Register Perspective”, Lloyd’s Register Approach to IMO Technical Measures in Reducing Greenhouse Gas Emissions from Ships.
9. Energy Efficiency Design Index (EEDI) <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx>
10. MARPOL Annex VI, MEPC.1 / Circ.684. Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator (EEOI), 17 August 2009.
11. MEPC.1/Circ.815: 2013. Guidance on treatment of innovative energy efficiency technologies for calculation and verification of the attained EEDI for ships in adverse conditions.
12. Tokuslu, A. (2020). Analyzing the Energy Efficiency Design Index (EEDI) Performance of a Container Ship. *International Journal of Environment and Geoinformatics (IJEGEO)*, 7(2): 114-119. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.703255>
13. Ančić, Ivica & Sestan, Ante & Vladimir, Nikola. (2015). Modification of the EEDI for Ro-ro Passenger Ships. <https://doi.org/10.5957/WMTC-2015-053>
14. ICCT (2011) “The Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships”, Policy Update 15, October 3-2011.
15. Tran, Tien Anh. (2016). Calculation and Assessing the EEDI Index in the Field of Ship Energy Efficiency for M/V Jules Garnier. *Journal of Marine Science: Research & Development*. 06. <https://doi.org/10.4172/2155-9910.1000212>.
16. Psaraftis, Harilaos & Kontovas, Christos. (2014). Ship speed optimization: Concepts, models and combined speed-routing scenarios. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 44. 52–69. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.03.001>.
17. Haakont (2011) “Development of small versus large hydropower in Norway-comparision of environmental impacts”, *Energy Procedia* 20: 185-199.
18. Tu, H.; Yang, Y.; Zhang, L.; Xie, D.; Lyu, X.; Song, L.; Guan, Y.; Sun, J. A modified admiralty coefficient for estimating power curves in EEDI calculations. *Ocean Eng.* 2018, 150, 309–317.
19. Ren H, Ding Y, Sui C. Influence of EEDI (Energy Efficiency Design Index) on Ship–Engine–Propeller Matching. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019; 7(12):425. <https://doi.org/10.3390/jmse7120425>
20. Yuan Y., Z. Li, R. Malekian, X. Yan (2017) Analysis of the operational ship energy efficiency considering navigation environmental impacts. *Journal of Marine Engineering & Technology* 16(3): 150-159. <https://doi.org/10.1080/20464177.2017.1307716>.

21. 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, 223-235. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.116.14>.
22. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Koryakin, K. (2021) Nature and origin of major security concerns and potential threats to the shipping industry. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 113, pp. 145–153. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2021.113.11>
23. Hundobyn A.A., Fynkel H.N. (1977). Dimensional modernization and conversion of ships [Razmernaia modernyzatsyia y pereoboru-dovanye sudov]. Lenynhrad: Sudostroenye, 192 p.
24. Wolf, R., Dickman, J., & Boas, R. (2005). Ship Design Using Heuristic Optimization Methods. 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. <https://doi.org/10.2514/6.2005-1980>
25. Shumylo O.M. (2022). Determining the optimal dimensions of the lengthening of passenger ships during their modernization. *Transport development [Vyznachennia optimalnykh rozmiriv podovzhennia pasazhyrskykh suden pry yikh modernizatsii]*. *Rozvytok transportu* № 1 (12). pp. 89-104.

## ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656.612:629.563.82

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.07>

### ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ І ФОРМУВАННЯ ПЛАНУ РОБОТИ ОФШОРНОГО ФЛОТУ ПРИ ОБСЛУГОВУВАННІ ВИДОБУВНИХ ПЛАТФОРМ

**О.А. Кравченко<sup>1</sup>, С.С. Боровик<sup>2</sup>, І.І. Тихоніна<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>к.т.н., доцент кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень»,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-3085-7449

<sup>2</sup>к.т.н., старший викладач кафедри «Експлуатація флоту і технологія  
морських перевезень»,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0003-4168-8537

<sup>3</sup>старший викладач кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень»,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-1945-9845

#### **Анотація**

**Вступ.** У статті наведені експериментальні розрахунки по моделі обґрунтування оптимальної структури суден постачання морських бурових платформ і організації їх роботи. Проведені розрахунки підтверджують мінімізацію транспортних витрат при обслуговуванні морських бурових платформ та отримання оптимальної структури спеціалізованих суден постачання платформ, варіанту маршруту роботи цих суден, враховуючи бюджет часу та несприятливі погодні умови. **Метою** статті є проведення експериментальних розрахунків по моделі обґрунтування структури і формування плану роботи спеціалізованих суден постачання при обслуговуванні морських бурових платформ. **Результати.** В роботі отримана оптимальна структура спеціалізованих суден по вантажопідйомності і визначено їх розподіл за варіантами маршруту роботи. Встановлено, що в період з низьким попитом на забезпечення платформ, достатньо використовувати один буксир на відміну від періодів з більш високим попитом на забезпечення. Визначено оптимальний маршрут роботи спеціалізованих суден з кількості розглянутих. Проаналізовано ефективність використання бюджету часу роботи спеціалізованих суден. Встановлено, що при несприятливих погодних умовах кількість суден в період низького попиту на забезпечення збільшується до 2-х буксирів, що, в свою чергу, збільшує витрати на транспортування 1 т вантажу. Проаналізовано вплив віддаленості бази від платформ та встановлено, що при скороченні відстані доцільніше використовувати короткі маршрути, які включають в себе по одній платформі. **Висновки.** Проведені експериментальні розрахунки підтверджують достовірність моделі обґрунтування структури і формування плану роботи спеціалізованих

суден постачання при обслуговуванні морських бурових платформ та її придатність для вирішення практичних завдань.

**Ключові слова:** спеціалізовані судна постачання, транспортне забезпечення платформ, обґрунтування структури спеціалізованих суден, планування роботи спеціалізованих суден, варіант маршрутів, бюджет часу, несприятливі погодні умови.

## JUSTIFICATION OF THE STRUCTURE AND FORMATION OF THE WORK PLAN OF THE OFFSHORE FLEET IN MAINTENANCE OF EXTRACTION PLATFORMS

O.A. Kravchenko<sup>1</sup>, S.S. Borovyk<sup>2</sup>, I.I. Tikhonina<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., Associate Professor at the Department

“Operation of the Fleet and Technology of Sea Transportation”,  
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-3085-7449

<sup>2</sup>Ph.D., Senior Lecturer at the Department

“Operation of the Fleet and Technology of Sea Transportation”,  
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0003-4168-8537

<sup>3</sup>Senior Lecturer at the Department

“Operation of the Fleet and Technology of Sea Transportation”,  
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-1945-9845

### Summary

**Introduction.** The article presents experimental calculations based on the model of substantiation of the optimal structure of vessels supplying offshore drilling platforms and the organization of their work. The performed calculations confirm the minimization of transport costs when servicing offshore drilling platforms and obtaining the optimal structure of specialized platform supply ships, the variant of the route of operation of these ships, taking into account the time budget and adverse weather conditions. **The purpose** of the article is to carry out experimental calculations based on the model of substantiation of the structure and the formation of the work plan of specialized supply vessels in the service of offshore drilling platforms. **The results.** In the work, the optimal structure of specialized vessels in terms of carrying capacity was obtained and their distribution according to the options of the work route was determined. It has been found that during periods of low demand for the provision of platforms, it is sufficient to use a single tug, in contrast to periods with a higher demand for provision. The optimal route of operation of specialized vessels from the number considered was determined. The efficiency of using the operating time budget of specialized vessels is analyzed. It has been established that in adverse weather conditions, the number of vessels in the period of low supply demand increases to 2 tugs, which, in turn, increases the cost of transporting 1 ton of cargo. The impact of the remoteness of the base from the platforms was analyzed and it was established that when shortening the distance, it is more appropriate to use short routes that include one platform each. **Conclusions.** The conducted experimental calculations confirm the reliability of the model of substantiation of the structure and formation of the work plan of specialized supply vessels in the service of offshore drilling platforms and its suitability for solving practical tasks.

**Key words:** specialized supply vessels, transport support of platforms, substantiation of the structure of specialized vessels, planning of operation of specialized vessels, option of routes, time budget, adverse weather conditions.

**Вступ.** Обслуговування морських бурових платформ складається з декількох завдань, серед яких найважливішими є визначення кількісного і якісного складу спеціалізованих суден, а також планування їх роботи при постачанні платформ та доставки на берег несправного обладнання і порожньої тари. Окремі дослідники такі як [1-6] зверталися до цієї проблеми з пропозиціями різного типу моделей для планування роботи офшорного флоту при обслуговуванні платформ. Авторами роботи [7, 8] надано класифікацію технічних засобів, що залучаються до облаштування родовищ в шельфах морів, а також представлено метод визначення необхідної кількості суден, що обслуговують морські бурові платформи. Питання розробки маршрутів висвітлені в [9, 10]. Але залишилися без уваги питання розробки та визначення маршруту роботи суден для оптимізації витрат по обслуговуванню платформ. Зазначені розробки орієнтовані на конкретну виробничу ситуацію та конкретну компанію, яка займається розробкою родовищ в шельфах морів. Існуючі розробки були вдосконалені в дослідженні [11] шляхом врахування чинників, які не розглядалися в існуючих роботах. Це дозволило в процесі оптимізації отримати результати, що в більшій мірі відповідають реальній ситуації і умовам роботи офшорних суден. А також, забезпечило осіб, котрі приймають рішення більш достовірною інформацією.

**Формулювання цілей статті.** Метою статті є проведення експериментальних розрахунків по обґрунтуванню структури і формування плану роботи спеціалізованих суден постачання при обслуговуванні морських бурових платформ.

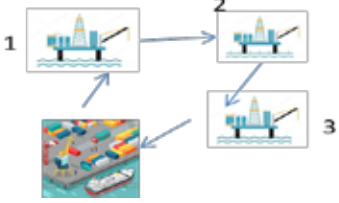

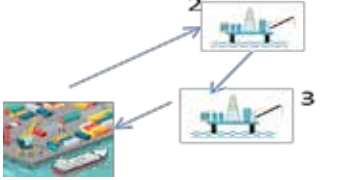
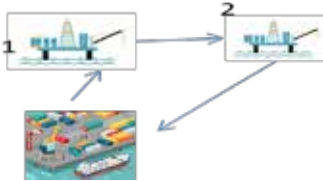
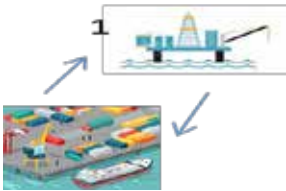
**Виклад основного матеріалу.** В існуючих розробках у вигляді моделей з даної проблеми поняття «ефективність» роботи спеціалізованих суден практично відсутня, апріорі приймається, що мінімізація витрат і забезпечує ефективність їх роботи. Для видобувної компанії ці витрати відносяться до виробничих витрат і, відповідно, чим вони менші, тим вище підсумковий прибуток.

Експериментальні розрахунки проведемо для трьох видобувних платформ. Розглянемо час планування роботи офшорного флоту – 6 місяців. В якості тимчасових періодів планування приймемо  $\tau=1$  місяць, 30 діб, відповідно,  $T=6$ , ( $t=\overline{1,6}$ ). Кількість варіантів залежить від кількості платформ для обслуговування. Нехай розглядається  $P=3$ , ( $p=\overline{1,3}$ ) платформ. С урахуванням того, що на практиці при обслуговуванні платформ найчастіше задіяні розвізно-збиральні варіанти, то далі розглядаємо саме таку сутність варіантів. За структурою, варіанти роботи (обходу платформ) включають в себе 3, 2 і по одній платформі (табл. 1). Загальна кількість варіантів  $n=7$ , ( $i=\overline{1,7}$ ). У цій же таблиці наведемо значення бінарного параметра  $A_i^p$ , що відображає участь тієї чи іншої платформи в даному варіанті маршруту обходу платформ.  $A_i^p$  приймає значення 1, якщо платформа  $p$  входить в варіант роботи суден  $i$ . В іншому випадку  $A_i^p$  приймає значення 0.

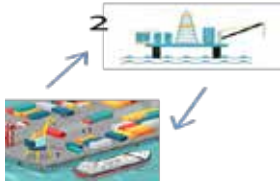
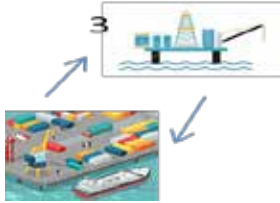
Відібрані  $m=3$ , ( $j=\overline{1,3}$ ) варіантів спеціалізованих суден з конкретними техніко-експлуатаційними та економічними характеристиками (табл. 2).

Таблиця 1

Характеристика варіантів роботи офшорних суден

Номер варіанта	Суть варіанта	$A_i^p$
$i=1$		$A_1^1 = 1$ $A_1^2 = 1$ $A_1^3 = 1$
$i=2$		$A_1^1 = 1$ $A_1^2 = 0$ $A_1^3 = 1$
$i=3$		$A_1^1 = 0$ $A_1^2 = 1$ $A_1^3 = 1$
$i=4$		$A_1^1 = 1$ $A_1^2 = 1$ $A_1^3 = 0$
$i=5$		$A_1^1 = 1$ $A_1^2 = 0$ $A_1^3 = 0$

Продовження таблиці 1

Номер варіанта	Суть варіанта	$A_i^P$
$i=6$		$A_1^1 = 0$ $A_1^2 = 1$ $A_1^3 = 0$
$i=7$		$A_1^1 = 0$ $A_1^2 = 0$ $A_1^3 = 1$

Таблиця 2

**Характеристики альтернативних офшорних суден**

Характеристики суден	Судно 1	Судно 2	Судно 3
Вантажопідйомність $D_j$ , т	1600	2100	2800
Швидкість $V_j$ , вузл.	12	12	12
Добові витрати на ходу $R_j^x$ , дол.	1000	1240	1410
Добові витрати на стоянці $R_j^{cm}$	300	400	480
Ставка тайм-чартерної оренди $R_j^{mч}$ , дол./добу	750	900	1000
Доступна кількість для оренди, од	3	3	3

Відзначимо, що ходовий час рейсу для всіх суден однаковий через однакову експлуатаційну швидкість. Бюджет фактичного часу  $T_t^J$  приймемо для всіх суден однаковим,  $T_t^J = 28$  ( $j=1,3, t=1,6$ ) діб.

Характеристики кожного варіанту роботи спеціалізованих суден залежать від параметрів судна, яке за цим варіантом буде працювати, і характеристик варіанту (відстаней між платформами і базою, відстанню між платформами).

Кожен варіант  $i=1, n$  для конкретного з 3 суден характеризується певним часом рейсу  $t^i$  ( $i=1,7, j=1,3$ ), яке визначається як сума складових елементів часу роботи спеціалізованих суден (табл. 3).

Таблиця 3

Час рейсу  $t_j^i$  та структура часу рейсу по варіантам та витрати  $r_j^i$   
по варіантам

Варіант	Судно 1				Судно 2				Судно 3			
	$t_{x1}^i$ , діб.	$t_{cm1}^i$ , діб.	$t_1^i$ , діб.	$r_1^i$ , дол.	$t_{x2}^i$ , діб.	$t_{cm2}^i$ , діб.	$t_2^i$ , діб.	$r_2^i$ , дол.	$t_{x3}^i$ , діб.	$t_{cm3}^i$ , діб.	$t_3^i$ , діб.	$r_3^i$ , дол.
1	1	0,9	1,9	1270	1	1,1	2,1	1680	1	1,4	2,4	2082
2	0,7	0,6	1,3	880	0,7	0,75	1,45	1168	0,7	1	1,7	1467
3	0,6	0,6	1,2	780	0,6	0,75	1,35	1044	0,6	1	1,6	1326
4	0,8	0,6	1,4	980	0,8	0,75	1,55	1292	0,8	1	1,8	1608
5	0,5	0,3	0,8	590	0,5	0,4	0,9	780	0,5	0,6	1,1	993
6	0,4	0,3	0,7	490	0,4	0,4	0,8	656	0,4	0,6	1	852
7	0,4	0,3	0,7	490	0,4	0,4	0,8	656	0,4	0,6	1	852

Витрати  $r_j^i$  на виконання роботи по кожному варіанту  $i=\overline{1,7}$  для кожного судна  $j=\overline{1,3}$  визначаються нормативами витрат по суднах на ходу і стоянці (табл. 3).

Кожній платформі відповідає певний попит на завезення до бази  $Q_t^p$  та вивезення вантажів від бази  $Q_t^p$ . Для подальших розрахунків прийемо, що попит на обслуговування платформ має два варіанти – один для  $t=1,2,6$  та інше для  $t=3,4,5$  (табл. 4).

Таблиця 4

Характеристика попиту на обслуговування платформ  
в періоди  $t=1,2,6$  та  $t=3,4,5$

Платформа	Мінімальне значення попиту $Q_t^{p \min}$ , тис.т	Максимальне значення попиту $Q_t^{p \max}$ , тис.т
	Періоди $t=1,2,6$	
p=1	40	48
p=2	50	60
p=3	65	78
Періоди $t=3,4,5$		
p=1	25	30
p=2	30	36
p=3	35	42

Таким чином, сформовані всі вихідні дані для моделі. Необхідно визначити оптимальну структуру флоту та сформувати план-графік роботи спеціалізованих суден по обслуговуванню платформ. Відзначимо, що відповідно до схеми експериментальних досліджень, на першому етапі вплив погодних умов не враховується.

У якості параметру управління виступають:

- $v_j \in Z^+ \cup 0, j=\overline{1,3}, t=\overline{1,6}$  – змінна, яка відповідає за вибір того чи іншого типу судна для тайм-чартерної оренди (з урахуванням тривалості оренди) для подальшої роботи з обслуговування платформ;
- $x_{jt}^i \in Z^+ \cup 0, i=\overline{1,7}, j=\overline{1,3}, t=\overline{1,6}$  – змінна, яка відповідає за закріплення судна типу  $j$  за варіантом роботи  $i$  в проміжок часу  $t$  і відображає кількість таких рейсів.

Цільова функція оптимізаційної моделі відображає прагнення забезпечити мінімізацію витрат на обслуговування платформ спеціалізованими судами. Дані витрати складаються з двох категорій: перша категорія – це витрати на тайм-чартерну оренду суден, друга – витрати експлуатаційні на їх роботу.

Математична модель в координатній формі має вигляд:

Цільова функція:

$$\begin{aligned}
 &750 \cdot 30 \cdot \left( v_1^1 + v_1^2 + v_1^3 + v_1^4 + v_1^5 \right) + 900 \cdot 30 \cdot \left( v_2^1 + v_2^2 + v_2^3 + v_2^4 + v_2^5 \right) + \\
 &+ 1000 \cdot 30 \cdot \left( v_3^1 + v_3^2 + v_3^3 + v_3^4 + v_3^5 \right) + 1270 \cdot \left( x_{11}^1 + x_{12}^1 + x_{13}^1 + x_{14}^1 + x_{15}^1 + x_{16}^1 \right) + \\
 &+ 1680 \cdot \left( x_{21}^1 + x_{22}^1 + x_{23}^1 + x_{24}^1 + x_{25}^1 + x_{26}^1 \right) + 2082 \cdot \left( x_{31}^1 + x_{32}^1 + x_{33}^1 + x_{34}^1 + x_{35}^1 + x_{36}^1 \right) + \\
 &+ 880 \cdot \left( x_{11}^2 + x_{12}^2 + x_{13}^2 + x_{14}^2 + x_{15}^2 + x_{16}^2 \right) + 1168 \cdot \left( x_{21}^2 + x_{22}^2 + x_{23}^2 + x_{24}^2 + x_{25}^2 + x_{26}^2 \right) + \\
 &+ 1467 \cdot \left( x_{31}^2 + x_{32}^2 + x_{33}^2 + x_{34}^2 + x_{35}^2 + x_{36}^2 \right) + 780 \cdot \left( x_{11}^3 + x_{12}^3 + x_{13}^3 + x_{14}^3 + x_{15}^3 + x_{16}^3 \right) + \\
 &+ 1044 \cdot \left( x_{21}^3 + x_{22}^3 + x_{23}^3 + x_{24}^3 + x_{25}^3 + x_{26}^3 \right) + 1326 \cdot \left( x_{31}^3 + x_{32}^3 + x_{33}^3 + x_{34}^3 + x_{35}^3 + x_{36}^3 \right) + \\
 &+ 980 \cdot \left( x_{11}^4 + x_{12}^4 + x_{13}^4 + x_{14}^4 + x_{15}^4 + x_{16}^4 \right) + 1292 \cdot \left( x_{21}^4 + x_{22}^4 + x_{23}^4 + x_{24}^4 + x_{25}^4 + x_{26}^4 \right) + \\
 &+ 1608 \cdot \left( x_{31}^4 + x_{32}^4 + x_{33}^4 + x_{34}^4 + x_{35}^4 + x_{36}^4 \right) + 590 \cdot \left( x_{11}^5 + x_{12}^5 + x_{13}^5 + x_{14}^5 + x_{15}^5 + x_{16}^5 \right) + \\
 &+ 780 \cdot \left( x_{21}^5 + x_{22}^5 + x_{23}^5 + x_{24}^5 + x_{25}^5 + x_{26}^5 \right) + 993 \cdot \left( x_{31}^5 + x_{32}^5 + x_{33}^5 + x_{34}^5 + x_{35}^5 + x_{36}^5 \right) + \\
 &+ 490 \cdot \left( x_{11}^6 + x_{12}^6 + x_{13}^6 + x_{14}^6 + x_{15}^6 + x_{16}^6 \right) + 656 \cdot \left( x_{21}^6 + x_{22}^6 + x_{23}^6 + x_{24}^6 + x_{25}^6 + x_{26}^6 \right) + \\
 &+ 852 \cdot \left( x_{31}^6 + x_{32}^6 + x_{33}^6 + x_{34}^6 + x_{35}^6 + x_{36}^6 \right) + 490 \cdot \left( x_{11}^7 + x_{12}^7 + x_{13}^7 + x_{14}^7 + x_{15}^7 + x_{16}^7 \right) + \\
 &+ 656 \cdot \left( x_{21}^7 + x_{22}^7 + x_{23}^7 + x_{24}^7 + x_{25}^7 + x_{26}^7 \right) + 852 \cdot \left( x_{31}^7 + x_{32}^7 + x_{33}^7 + x_{34}^7 + x_{35}^7 + x_{36}^7 \right) \longrightarrow \min
 \end{aligned} \tag{1}$$

Обмеження за обсягом транспортної роботи (попиту) для кожної платформи:

Перша платформа, перший період  $p=1, t=1$

$$\begin{aligned}
 &40000 \leq 1600 \cdot \left( x_{11}^1 + x_{11}^2 + x_{11}^4 + x_{11}^5 \right) + 2100 \cdot \left( x_{21}^1 + x_{21}^2 + x_{21}^4 + x_{21}^5 \right) + \\
 &+ 2800 \cdot \left( x_{31}^1 + x_{31}^2 + x_{31}^4 + x_{31}^5 \right) \leq 48000
 \end{aligned} \tag{2}$$

Перша платформа, другий період  $p=1, t=2$

$$\begin{aligned}
 &40000 \leq 1600 \cdot \left( x_{12}^1 + x_{12}^2 + x_{12}^4 + x_{12}^5 \right) + 2100 \cdot \left( x_{22}^1 + x_{22}^2 + x_{22}^4 + x_{22}^5 \right) + \\
 &+ 2800 \cdot \left( x_{32}^1 + x_{32}^2 + x_{32}^4 + x_{32}^5 \right) \leq 48000
 \end{aligned} \tag{3}$$

Перша платформа, третій період  $p=1, t=3$

$$25000 \leq 1600 \cdot \left( x_{13}^1 + x_{13}^2 + x_{13}^4 + x_{13}^5 \right) + 2100 \cdot \left( x_{23}^1 + x_{23}^2 + x_{23}^4 + x_{23}^5 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{33}^1 + x_{33}^2 + x_{33}^4 + x_{33}^5 \right) \leq 30000 \quad (4)$$

Перша платформа, четвертий період  $p=1, t=4$

$$25000 \leq 1600 \cdot \left( x_{14}^1 + x_{14}^2 + x_{14}^4 + x_{14}^5 \right) + 2100 \cdot \left( x_{24}^1 + x_{24}^2 + x_{24}^4 + x_{24}^5 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{34}^1 + x_{34}^2 + x_{34}^4 + x_{34}^5 \right) \leq 30000 \quad (5)$$

Перша платформа, п'ятий період  $p=1, t=5$

$$25000 \leq 1600 \cdot \left( x_{15}^1 + x_{15}^2 + x_{15}^4 + x_{15}^5 \right) + 2100 \cdot \left( x_{25}^1 + x_{25}^2 + x_{25}^4 + x_{25}^5 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{35}^1 + x_{35}^2 + x_{35}^4 + x_{35}^5 \right) \leq 30000 \quad (6)$$

Перша платформа, шостий період  $p=1, t=6$

$$40000 \leq 1600 \cdot \left( x_{16}^1 + x_{16}^2 + x_{16}^4 + x_{16}^5 \right) + 2100 \cdot \left( x_{26}^1 + x_{26}^2 + x_{26}^4 + x_{26}^5 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{36}^1 + x_{36}^2 + x_{36}^4 + x_{36}^5 \right) \leq 48000 \quad (7)$$

Друга платформа, перший період  $p=2, t=1$

$$50000 \leq 1600 \cdot \left( x_{11}^1 + x_{11}^3 + x_{11}^4 + x_{11}^6 \right) + 2100 \cdot \left( x_{21}^1 + x_{21}^3 + x_{21}^4 + x_{21}^6 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{31}^1 + x_{31}^3 + x_{31}^4 + x_{31}^6 \right) \leq 60000 \quad (8)$$

Друга платформа, другий період  $p=2, t=2$

$$50000 \leq 1600 \cdot \left( x_{12}^1 + x_{12}^3 + x_{12}^4 + x_{12}^6 \right) + 2100 \cdot \left( x_{22}^1 + x_{22}^3 + x_{22}^4 + x_{22}^6 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{32}^1 + x_{32}^3 + x_{32}^4 + x_{32}^6 \right) \leq 60000 \quad (9)$$

Друга платформа, третій період  $p=2, t=3$

$$30000 \leq 1600 \cdot \left( x_{13}^1 + x_{13}^3 + x_{13}^4 + x_{13}^6 \right) + 2100 \cdot \left( x_{23}^1 + x_{23}^3 + x_{23}^4 + x_{23}^6 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{33}^1 + x_{33}^3 + x_{33}^4 + x_{33}^6 \right) \leq 36000 \quad (10)$$

Друга платформа, четвертий період  $p=2, t=4$

$$30000 \leq 1600 \cdot \left( x_{14}^1 + x_{14}^3 + x_{14}^4 + x_{14}^6 \right) + 2100 \cdot \left( x_{24}^1 + x_{24}^3 + x_{24}^4 + x_{24}^6 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{34}^1 + x_{34}^3 + x_{34}^4 + x_{34}^6 \right) \leq 36000 \quad (11)$$

Друга платформа, п'ятий період  $p=2, t=5$

$$30000 \leq 1600 \cdot \left( x_{15}^1 + x_{15}^3 + x_{15}^4 + x_{15}^6 \right) + 2100 \cdot \left( x_{25}^1 + x_{25}^3 + x_{25}^4 + x_{25}^6 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{35}^1 + x_{35}^3 + x_{35}^4 + x_{35}^6 \right) \leq 36000 \quad (12)$$

Друга платформа, шостий період  $p=2, t=6$

$$50000 \leq 1600 \cdot \left( x_{16}^1 + x_{16}^3 + x_{16}^4 + x_{16}^6 \right) + 2100 \cdot \left( x_{26}^1 + x_{26}^3 + x_{26}^4 + x_{26}^6 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{36}^1 + x_{36}^3 + x_{36}^4 + x_{36}^6 \right) \leq 60000 \quad (13)$$

Третя платформа, перший період  $p=3, t=1$

$$65000 \leq 1600 \cdot \left( x_{11}^1 + x_{11}^2 + x_{11}^3 + x_{11}^7 \right) + 2100 \cdot \left( x_{21}^1 + x_{21}^2 + x_{21}^3 + x_{21}^7 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{31}^1 + x_{31}^2 + x_{31}^3 + x_{31}^7 \right) \leq 78000 \quad (14)$$

Третя платформа, другий період  $p=3, t=2$

$$65000 \leq 1600 \cdot \left( x_{12}^1 + x_{12}^2 + x_{12}^3 + x_{12}^7 \right) + 2100 \cdot \left( x_{22}^1 + x_{22}^2 + x_{22}^3 + x_{22}^7 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{32}^1 + x_{32}^2 + x_{32}^3 + x_{32}^7 \right) \leq 78000 \quad (15)$$

Третя платформа, третій період  $p=3, t=3$

$$35000 \leq 1600 \cdot \left( x_{13}^1 + x_{13}^2 + x_{13}^3 + x_{13}^7 \right) + 2100 \cdot \left( x_{23}^1 + x_{23}^2 + x_{23}^3 + x_{23}^7 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{33}^1 + x_{33}^2 + x_{33}^3 + x_{33}^7 \right) \leq 42000 \quad (16)$$

Третя платформа, четвертий період  $p=3, t=4$

$$35000 \leq 1600 \cdot \left( x_{14}^1 + x_{14}^2 + x_{14}^3 + x_{14}^7 \right) + 2100 \cdot \left( x_{24}^1 + x_{24}^2 + x_{24}^3 + x_{24}^7 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{34}^1 + x_{34}^2 + x_{34}^3 + x_{34}^7 \right) \leq 42000 \quad (17)$$

Третя платформа, п'ятий період  $p=3$ ,  $t=5$

$$35000 \leq 1600 \cdot (x_{15}^1 + x_{15}^2 + x_{15}^3 + x_{15}^7) + 2100 \cdot (x_{25}^1 + x_{25}^2 + x_{25}^3 + x_{25}^7) + \\ + 2800 \cdot (x_{35}^1 + x_{35}^2 + x_{35}^3 + x_{35}^7) \leq 42000 \quad (18)$$

Третя платформа, шостий період  $p=3$ ,  $t=6$

$$65000 \leq 1600 \cdot (x_{16}^1 + x_{16}^2 + x_{16}^3 + x_{16}^7) + 2100 \cdot (x_{26}^1 + x_{26}^2 + x_{26}^3 + x_{26}^7) + \\ + 2800 \cdot (x_{36}^1 + x_{36}^2 + x_{36}^3 + x_{36}^7) \leq 78000 \quad (19)$$

Обмеження по бюджету часу суден:  
для першого судна  $j=1$

$$1,9 \cdot x_{1t}^1 + 1,3 \cdot x_{1t}^2 + 1,2 \cdot x_{1t}^3 + 1,4 \cdot x_{1t}^4 + 0,8 \cdot x_{1t}^5 + 0,7 \cdot x_{1t}^6 + 0,7 \cdot x_{1t}^7 \leq 28 \cdot v_1^t, t = \overline{1, T} \quad (20)$$

для другого судна  $j=2$

$$2,1 \cdot x_{2t}^1 + 1,45 \cdot x_{2t}^2 + 1,35 \cdot x_{2t}^3 + 1,55 \cdot x_{2t}^4 + 0,9 \cdot x_{2t}^5 + 0,8 \cdot x_{2t}^6 + 0,8 \cdot x_{2t}^7 \leq 28 \cdot v_2^t, t = \overline{1, T} \quad (21)$$

для третього судна  $j=3$

$$2,4 \cdot x_{3t}^1 + 1,7 \cdot x_{3t}^2 + 1,6 \cdot x_{3t}^3 + 1,8 \cdot x_{3t}^4 + 1,1 \cdot x_{3t}^5 + 1 \cdot x_{3t}^6 + 1 \cdot x_{3t}^7 \leq 28 \cdot v_3^t, t = \overline{1, T} \quad (22)$$

Оптимізація проводилася за допомогою Пошук рішення Excel.

В результаті оптимізації отримана наступна структура флоту і його розподілу за варіантами роботи (табл. 5).

Таблиця 5

Структура флоту і його розподілу за варіантами роботи

Структура флоту, змінні						
Час	1	2	3	4	5	6
$v_1$	1	1	0	0	0	1
$v_2$	0	1	0	0	0	1
$v_3$	1	0	1	1	1	0
Розподілення суден, змінні						
Судно 1						
Схема 1	0	0	0	0	0	0
Схема 2	3	7	0	0	0	7
Схема 3	16	16	0	0	0	16
Схема 4	0	0	0	0	0	0
Схема 5	0	0	0	0	0	0
Схема 6	0	0	0	0	0	0
Схема 7	0	0	0	0	0	0

Продовження таблиці 5

Структура флоту, змінні						
Час	1	2	3	4	5	6
Судно 2						
Схема 1	0	12	0	0	0	12
Схема 2	0	2	0	0	0	2
Схема 3	0	0	0	0	0	0
Схема 4	0	0	0	0	0	0
Схема 5	0	0	0	0	0	0
Схема 6	0	0	0	0	0	0
Схема 7	0	0	0	0	0	0
Судно 3						
Схема 1	9	0	7	7	7	0
Схема 2	4	0	2	2	2	0
Схема 3	0	0	4	4	4	0
Схема 4	0	0	0	0	0	0
Схема 5	0	0	0	0	0	0
Схема 6	0	0	0	0	0	0
Схема 7	0	0	0	0	0	0

Аналіз рішення дозволяє зробити наступні висновки:

- 1) в періоди часу  $t = 1, 2, 6$ , тобто періоди з більш високим попитом на забезпечення платформ, слід орендувати в тайм-чартер і використовувати 2 буксира;
- 2) в періоди часу  $t = 3, 4, 5$ , тобто в періоди більш низького попиту, досить використовувати один буксир;
- 3) з розглянутих 7 варіантів роботи суден (обходу платформ), оптимальними є наступні варіанти (рис. 1).

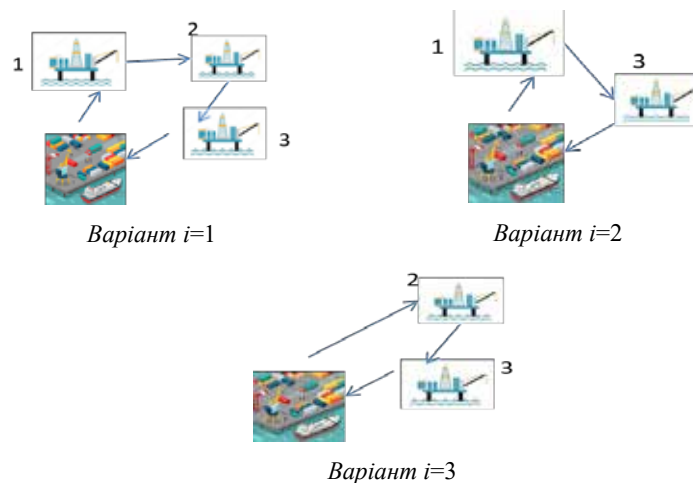


Рис. 1. Оптимальні варіанти роботи суден

Значення цільової функції становлять 424 845 дол., таким чином, усереднені витрати на доставку 1 т вантажів в цілому по системі поставок становлять

2,74 дол./т, де сумарна кількість всіх вантажів, що перевозяться (по мінімальній межі) становить  $Q_t^{p \max} = 155000$  т.

$$\text{Сумарні витрати } \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^m R_j^{m_t} \cdot \tau \cdot v_j^t + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n R_j^i \cdot x_{jt}^i = 424845 \text{ дол.}$$

Проте, забезпечення мінімізації витрат в рамках моделі може не забезпечувати «реальну» їх мінімізацію. Тому отримане рішення по кожній з моделі повинно бути проаналізовано з точки зору ефективності роботи кожного судна.

Оцінимо економічну доцільність отриманого оптимального варіанту забезпечення видобувних платформ за допомогою співставлення часу роботи суден отриманому в результаті рішення оптимального плану із експлуатаційним періодом

$$\frac{\sum_{i=1}^7 t_j^i \cdot x_{jt}^i}{\tau} \geq \beta, j = \overline{1,3}, t = \overline{1,6} \quad (25)$$

де  $0 < \beta < 1$  – коефіцієнт, який відображає допустиму межу використання бюджету часу орендованих суден і задається особою, яка приймає рішення (згідно зі статистикою роботи подібних суден в подібних умовах). Наприклад,  $\beta = 0,75$  означає, що судна, які використовуються на забезпеченні постачання платформ менш, ніж 75% свого бюджету часу, визнаються як неефективно використовувані.

Згідно розрахунків, оптимальному плану відповідають наступні значення для часу роботи суден та коефіцієнт, що відображає допустиму межу використання бюджету часу орендованих суден (табл. 6).

Таблиця 6

**Ефективність бюджету часу**

Варіанти	Час роботи суден по періодах, діб					
	1	2	3	4	5	6
Судно 1	22	28	0	0	0	28
Судно 2	0	27	0	0	0	27
Судно 3	28	0	26	26	26	0
Варіанти	Коефіцієнт $\beta$					
	1	2	3	4	5	6
Судно 1	0,785	1	0	0	0	1
Судно 2	0	0,964	0	0	00	0,964
Судно 3	1	0	0,928	0,928	0,928	0

Як показують розрахунки, практично для всіх суден і всіх тимчасових періодів, використання бюджету часу 92-100%, що є дуже високим показником. Тому можна вважати, що отримане рішення є економічно доцільним.

Умова (25) забезпечує «раціональне» використання бюджету часу орендованого судна, що визначається більше нуля значенням сумарного часу його роботи в аналізованому періоді. Якщо при перевірці виникнуть ситуації, коли умова (25) не виконується, то вихідні дані повинні бути відкориговані з урахуванням результатів аналізу отриманого рішення, якщо це необхідно.

Відзначимо, що на першому етапі експериментальних розрахунків не враховували можливий негативний вплив погодних умов. І, при бюджеті часу суден, що практично повністю використовується, в разі виникнення несприятливих погодних умов відсутня практична можливість даними кількістю і складом флоту виконати всі умови поставок.

Відповідно до запропонованого підходу, спираючись на існуючі розробки [12-14], до обліку негативного впливу погодних умов, нехай час рейсів в середньому збільшується на 10%, тобто поправочний коефіцієнт  $I_n = 1,1$ . Відповідні значення вихідних даних наведено в табл. 7.

Таблиця 7

**Час рейсу та витрати за варіантами  
з урахуванням поправочного коефіцієнта**

Варіант обходу	Судно 1		Судно 2		Судно 3	
	$t_j^i$ , діб	$r_j^i$ , дол.	$t_j^i$ , діб	$r_j^i$ , дол.	$t_j^i$ , діб	$r_j^i$ , дол.
Схема 1	2,09	1397	2,31	1848	2,64	2290
Схема 2	1,43	968	1,595	1285	1,87	1614
Схема 3	1,32	858	1,485	1148	1,76	1459
Схема 4	1,54	1078	1,705	1421	1,98	1769
Схема 5	0,88	649	0,99	858	1,21	1092
Схема 6	0,77	539	0,88	722	1,1	937
Схема 7	0,77	539	0,88	722	1,1	937

В результаті оптимізації отримана наступна структура флоту і його розподілу за варіантами роботи (табл. 8).

Таблиця 8

**Структура флоту і його розподіл за варіантами роботи  
з урахуванням поправочного коефіцієнта**

Структура флоту, змінні						
Час	1	2	3	4	5	6
$v_1$	0	0	2	2	2	0
$v_2$	1	1	0	0	0	1
$v_3$	1	1	0	0	0	1
Розподілення суден, змінні						
Судно 1						
Схема 1	0	0	13	13	13	0
Схема 2	0	0	3	3	3	0
Схема 3	0	0	6	6	6	0
Схема 4	0	0	0	0	0	0
Схема 5	0	0	0	0	0	0
Схема 6	0	0	0	0	0	0
Схема 7	0	0	0	0	0	0

Продовження таблиці 8

Структура флоту, змінні						
Час	1	2	3	4	5	6
Судно 2						
Схема 1	0	0	0	0	0	0
Схема 2	4	4	0	0	0	4
Схема 3	12	12	0	0	0	12
Схема 4	0	0	0	0	0	0
Схема 5	0	0	0	0	0	0
Схема 6	0	0	0	0	0	0
Схема 7	0	0	0	0	0	0
Судно 3						
Схема 1	9	9	0	0	0	9
Схема 2	2	2	0	0	0	2
Схема 3	0	0	0	0	0	0
Схема 4	0	0	0	0	0	0
Схема 5	0	0	0	0	0	0
Схема 6	0	0	0	0	0	0
Схема 7	0	0	0	0	0	0

В результаті рішення задачі з урахуванням поправочного коефіцієнту були отримані наступні результати:

1) в періоди часу  $t = 1, 2, 6$ , тобто періоди з більш високим попитом на забезпечення платформ, як і раніше, слід орендувати в тайм-чартер і використовувати 2 буксира;

2) в періоди часу  $t = 3, 4, 5$  число необхідних суден збільшилася до 2-х, що збільшило усереднені витрати на доставку 1 т вантажу;

3) з розглянутих 7 варіантів роботи суден (обходу платформ), оптимальними залишаються перші три варіанти (див. рис. 1);

Значення цільової функції становить 512 734 дол., таким чином, усереднені витрати на доставку 1 т вантажів в цілому по системі поставок становлять 3,31 дол./т, сумарні витрати 512 734 дол.

Аналогічно викладеного раніше, було проведено аналіз ефективності використання бюджету часу суден (табл. 9).

Таблиця 9

**Ефективність бюджету часу з урахуванням впливу погодних умов**

Варіанти	Час роботи суден по періодах, діб					
	1	2	3	4	5	6
Судно 1	0	0	39	39	39	0
Судно 2	24	24	0	0	0	24
Судно 3	28	28	0	0	0	28
Варіанти	Коефіцієнт $\beta$					
	1	2	3	4	5	6
Судно 1	0	0	0,696	0,696	0,696	0
Судно 2	0,857	0,857	0	0	0	0,857
Судно 3	1	1	0	0	0	1

Таким чином, збільшення тривалості рейсів під впливом погодних умов обґрунтувало необхідність використання додаткових суден, але в цілому, ефективність використання бюджету часу суден як і раніше залишається високою (від 70-100 %).

Відзначимо, що згідно з прийнятим вихідними даними оптимальними з'явилися варіанти роботи 1, 2, 3, що передбачають обхід 2 і 3 платформ. Проаналізуємо, як впливає відстань від бази до платформ на оптимальні варіанти роботи суден (маршрутів обходу платформ). У процесі експериментальних досліджень здійснювалося варіювання дальністю бази на величину в проміжку 25-90 миль як в сторону зменшення, так і в бік збільшення. Висновки, які були зроблені після розрахунків відображають перевагу коротких варіантів обходу (по одній платформі) при відносній близькості бази від платформ і довших (по 2 або 3 платформи) при відносній віддаленості бази від платформ.

**Висновки.** Таким чином, в роботі були проведені та представлені результати експериментальних розрахунків по моделі обґрунтування структури і формування плану роботи спеціалізованих суден постачання при обслуговуванні морських бурових платформ. Отримані результати підтверджують можливість отримати оптимальну структуру спеціалізованих суден по вантажопідйомності і визначити їх розподіл за варіантами маршруту роботи. Встановлено, що в періоди з низьким попитом на забезпечення платформ, достатньо використовувати один буксир на відміну від періодів з більш високим попитом на забезпечення. З урахуванням несприятливих погодних умов кількість суден в період низького попиту на забезпечення збільшується до 2-х буксирів, що, в свою чергу, збільшує витрати на транспортування 1 т вантажу. Оцінка ефективності використання бюджету часу роботи спеціалізованих суден дозволила стверджувати, що судна експлуатуються ефективно. А також проаналізовано вплив віддаленості бази від платформ та встановлено, що при скороченні відстані доцільніше використовувати короткі маршрути, які включають в себе по одній платформі. Отже, проведені експериментальні розрахунки підтверджують достовірність моделі обґрунтування структури і формування плану роботи спеціалізованих суден постачання при обслуговуванні морських бурових платформ та її придатність для вирішення практичних завдань.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Halvorsen-Weare, E. E., Fagerholt, K. Optimization in offshore supply vessel planning. *Optimization and Engineering*. 2017. № 18(1), P. 317-341. DOI: 10.1007/s11081-016-9315-4.
2. Azi, N., Gendreau, M., Potvin, J. Y. An exact algorithm for a vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles. *European Journal of Operational Research*. 2010. № 202(3), P. 756-763.
3. Fagerholt, K. Optimal fleet design in a ship routing problem. *International transactions in operational research*. 1999. № 6(5), P. 453-464.
4. Gribkovskaia, I., Laporte, G., Shlopak, A. A tabu search heuristic for a routing problem arising in servicing of offshore oil and gas platforms. *Journal of the Operational Research Society*. 2008. № 59(11), P. 1449-1459.
5. Halvorsen-Weare, E. E., Fagerholt, K., Nonås, L. M., Asbjørnslett, B. E. Optimal fleet composition and periodic routing of offshore supply

- vessels. *European Journal of Operational Research*. 2012. № 223(2), P. 508-517.
6. Tan, C. C. R., Beasley, J. E. A heuristic algorithm for the period vehicle routing problem. *Omega*. 1984. № 12(5), P. 497-504.
  7. Макеев Г.А. Определение необходимого и достаточного количества судов обслуживающего морские буровые установки флота. *Морской вестник*. СПб., 2008. № 1 (25). С. 39-42.
  8. Шибяев О.Г., Акімова О.В., Кравченко О.А. Класифікація технічних засобів, що забезпечують процес видобутку і транспортування вуглеводнів в шельфах Чорного та Азовського морів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. № 4 (234). С. 119-125. ISSN 1998-7927.
  9. Akimova O., Kravchenko A. Development of the methodology of the choice of the route of work of platform supply vessels in the shelf of the seas. *International Journal "Technology audit and production reserves"*. 2018. Vol. 5, № 2 (43). pp. 30-35. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.146322.
  10. Akimova O., Kravchenko A. Development of a method for selecting a way of raw material transportation from the offshore drilling platform to the onshore infrastructure. *International Journal "Technology audit and production reserves"*. 2019. Vol. 2, № 2 (46). pp. 25-31. DOI: 10.15587/2312-8372.2019.169423.
  11. Кравченко О.А. Обґрунтування оптимальної структури суден постачання морських бурових платформ і організація їх роботи. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2019. № 3 (251). С. 94-100. ISSN 1998-7927.
  12. Онищенко С.П., Вишневская О.Д. Обеспечение эффективности выполнения судном рейса с учетом возможного воздействия факторов риска. *Вісник економіки транспорту і промисловості: зб. наук.-практ. ст.* Харків: УкрДУЗТу, 2016. № 56. С. 104-113.
  13. Вишневская О.Д. Факторы риска, обуславливающие отклонения результатов выполнения рейса морским судном. *SWorld: сб. науч. тр.* 2016. №45 (1). С. 33-36.
  14. Стецюк Т.Г. Сизов В.Г. К вопросу о расчетном определении падения скорости судна в штормовых условиях плавания. *Судовождение*. 2010. С. 22-27.

#### REFERENCES

1. Halvorsen-Weare, E. E. & Fagerholt, K. (2017). Optimization in offshore supply vessel planning. *Optimization and Engineering*, 18(1), 317-341. – DOI: 10.1007/s11081-016-9315-4.
2. Azi, N., Gendreau, M., & Potvin, J. Y. (2010). An exact algorithm for a vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles. *European Journal of Operational Research*, 202(3), 756-763.
3. Fagerholt, K. (1999). Optimal fleet design in a ship routing problem. *International transactions in operational research*, 6(5), 453-464.

4. Gribkovskaia, I., Laporte, G. & Shlopak, A. (2008). A tabu search heuristic for a routing problem arising in servicing of offshore oil and gas platforms. *Journal of the Operational Research Society*, 59(11), 1449-1459.
5. Halvorsen-Weare, E. E., Fagerholt, K., Nonås, L. M. & Asbjørnslett, B. E. (2012). Optimal fleet composition and periodic routing of offshore supply vessels. *European Journal of Operational Research*, 223(2), 508-517.
6. Tan, C. C. R. & Beasley, J. E. (1984). A heuristic algorithm for the period vehicle routing problem. *Omega*, 12(5), 497-504.
7. Makeev G.A. (2008). Determining the necessary and sufficient number of ships of the fleet serving offshore drilling rigs [Opredelenie neobhodimogo i dostatochnogo kolichestva sudov obsluzhivayushego morskije burovyje ustanovki flota]. *Maritime Gazette*, 1 (25), 39-42. [in Russian].
8. Shibaev O.G., Akimova O.V. & Kravchenko O.A. (2017). Classification of technical means that ensure the process of extraction and transportation of hydrocarbons on the shelves of the Black and Azov seas [Klasyfikatsiia tekhnichnykh zasobiv, shcho zabezpechuiut protses vydobutku i transportuvannia vuhlevodniv v shelfakh Chornoho ta Azovskoho moriv]. *Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl*, 4 (234), 119-125. ISSN 1998-7927. [in Russian].
9. Akimova O.V. & Kravchenko A.A. (2018). Development of the methodology of the choice of the route of work of platform supply vessels in the shelf of the seas. *International Journal "Technology audit and production reserves"*, 2 (43), 30-35. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.146322.
10. Akimova O.V. & Kravchenko A.A. (2019). Development of a method for selecting a way of raw material transportation from the offshore drilling platform to the onshore infrastructure. *International Journal "Technology audit and production reserves"*, № 2 (46), 25-31. DOI: 10.15587/2312-8372.2019.169423. [in Ukrainian].
11. Kravchenko O.A. (2019). Justification of the optimal structure of vessels for the supply of offshore drilling platforms and the organization of their work [Obgruntuvannia optymalnoi struktury suden postachannia morskyykh burovykh platform i orhanizatsiia yikh roboty]. *Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl*, 3 (251), 94-100. ISSN 1998-7927. [in Ukrainian].
12. Onishchenko S.P. & Vishnevskaya O.D. (2016). Ensuring the efficiency of the ship's voyage, taking into account the possible impact of risk factors [Obespechenie effektivnosti vypolneniya sudnom rejsa s uchetom vozmozhnogo vozdeystviya faktorov riska]. *Herald of the economy of transport and industry: coll. science and practice Art.*, 56, 104-113. [in Russian].
13. Vishnevskaya O.D. (2016). Risk factors causing deviations in the results of a voyage by sea vessel [Fakторы riska, obuslavlivayushie otkloneniya rezultatov vypolneniya rejsa morskim sudnom]. *SWorld: Sat. science tr.*, 45 (1), 33-36. [in Russian].
14. Stetsyuk T.G. & Sizov V.G. (2010). To the question of the calculated determination of the drop in the ship's speed in stormy sailing conditions [K voprosu o raschetnom opredelenii padeniya skorosti sudna v shtormovykh usloviyah plavaniya]. *Court proceedings 2010*. pp. 22-27. [in Russian].

**MODERN METHOD OF COMPASS ERROR CALCULATION  
BY THE CELESTIAL BODIES USING MATLAB ENVIRONMENT**

**O.G. Kupraty**

Senior Lecturer at the Department “Navigation and Marine Safety”,  
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0003-3519-504X

**Summary**

*In modern conditions, the role of information technology for safe navigation is growing. The article works out a method for calculating the compass error through the interaction of the MATLAB software environment and the MS Excel software environment. Modern navigation requires new approaches to solving the problem of calculating the compass error for celestial bodies. To implement these approaches, the author developed an algorithm and wrote the code in the above software environment. The MATLAB software environment allows you to take data from an electronic astronomical almanac and process it automatically according to the algorithm. Great importance is attached to the signs of parameters A and B. The program code contains the conditions for selecting a sign for parameter A by latitude, for parameter B by the local time angle and declination.*

*The work used an almanac in the format in MS Excel. Analyzing the almanac, an algorithm was developed that starts from the winter and summer solstice, that is, 2 declinations, 2 points, from which the direction of the declination graph changes from growth to descending and vice versa.*

*The solstice is the moment in time at which the center of the Sun passes either through the northernmost point of the ecliptic, which has a declination of  $+23^{\circ} 27'$ , or through its southernmost point, which has a declination of  $-23^{\circ} 27'$ .*

*The algorithm uses 5 dates: the solstice of last year, 2 solstices of the year in which the observation took place, the day of observation and the last day of the year. Data on the Sun on the day of observation are combined into matrices, from which are then selected the required value.*

**Key words:** *compass error, MATLAB, solstice, declination, true bearing (TB).*

**СУЧАСНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПОПРАВКИ КОМПАСУ  
ПО НЕБЕСНИМ ТІЛАМ З ВИКОРИСТАННЯМ СЕРЕДОВИЩА MATLAB**

**О.Г. Купратий**

старший викладач кафедри «Судноводіння і морської безпеки»,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0003-3519-504X

**Анотація**

*В сучасних умовах зростає роль інформаційних технологій для безпечної навігації. У статті опрацьовується метод розрахунку поправки компасу через взаємодію програмного середовища MATLAB та програмного середовища MS Excel.*

Сучасна навігація потребує нових підходів до розв'язання задачі розрахунку поправки компасу по небесним тілам. Для реалізації цих підходів автором було розроблено алгоритм і прописано код у вище зазначеному програмному середовищі. Програмне середовище MATLAB дозволяє брати дані з електронного астрономічного альманаху і опрацьовувати їх в автоматичному режимі згідно алгоритму. Велике значення приділено знакам параметрів  $A$  і  $B$ . В програмному коді прописано умови вибору знаку для параметру  $A$  за широтою, для параметру  $B$  за місцевим часовим кутом  $LHA$  та схиленням  $DEC$ .

У роботі було використано альманах у форматі в MS Excel. Аналізуючи альманах, було розроблено алгоритм, що відштовхується від зимового і літнього сонцестояння, тобто 2 схилення, 2 точки, від яких змінюється напрям графіку схилення від зростання на спадання і навпаки.

Сонцестояння – момент часу, у який центр Сонця проходить або через найпівнічнішу точку екліптики, що має схилення  $+23^{\circ} 27'$ , або через найпівденнішу її точку, що має схилення  $-23^{\circ} 27'$ .

В алгоритмі використовуються 5 дат: сонцестояння минулого року, 2 сонцестояння року, в якому відбулася обсервація, день обсервації і останній день року. Дані по Сонцю в день обсервації комбінуються в матриці, з яких потім вибирається необхідне значення.

**Ключові слова:** поправка компаса, MATLAB, сонцестояння, схилення, справжній пеленг (СП).

### **Introduction and problem statement**

Nautical astronomy (Celestial navigation) as a subject is going through difficult times, electronic navigation instruments displace the need to use it to determine the location of the vessel, but according to the Bridge Procedure Guide, the determination of the correction of the magnetic and gyroscopic compass must be carried out regularly.

It is important to pay attention to the requirements prescribed in the STCW Convention, in Table A-II/1 [1], and Section B-II/1 for the level of ship operation and management. These tables summarize the minimum requirements for competence, which include skills in nautical astronomy.

Determining the compass error by celestial bodies is a standard procedure carried out by the navigator regularly, in the presence of a cloudless sky. Figure 1 below shows the algorithm for calculating the true bearing on the star using the MS Excel and MATLAB environments.

Considering the Earth stationary, the celestial sphere is given a rotation inverse to the daily rotation (from E to W).

As a result, all the bodies distant from the celestial equator by the magnitude of the conjugation of  $\delta$  describe the daily parallels. This is the visible movement of luminaries due to the rotation of the Earth, convenient for presenting the physics of phenomena and solving problems. During the daily movement, the rapid line  $zn$ , the meridian observing the true horizon remain stationary.

The beginning of the stellar day is taken as the moment of the upper culmination of the point spring equinox.

### Analysis of recent research and publications

Section B-II/1 for the level of operation and management of the response [1] notes such requirements for training: correctly adjust sextant for adjustable errors, determine corrected reading of the sextant altitude of celestial bodies, accurate sight reduction computation, using a preferred method, calculate the time of meridian altitude of the sun, calculate latitude by Polaris or by meridian altitude of the sun, accurate plotting of position line(s) and position fixing, determine time of visible rising/setting sun by a preferred method, identify and select the most suitable celestial bodies in the twilight period, determine compass error by azimuth or by amplitude, using a preferred method, nautical astronomy as required to support the required competence, that required above

Training in celestial navigation may include the use of electronic nautical almanac and celestial navigation calculation software. [1]

Works of Aleksyshyn V.G., Dolgochub V.T., Belov O.V. [4] and Kudryavtsev V.G., Mikhailov V.S. [21-23] are devoted to modern theoretical and practical research in the field of nautical astronomy. But they do not highlight the possibilities of modern information technology.

**The purpose of the work:** to assess the possibilities of interaction between the software environment MATLAB and MS Excel for calculating the compass error by celestial bodies.

#### Tasks:

1. Develop an algorithm for calculating the compass error by the Sun
2. Create a program code for calculating the compass error in MATLAB, which takes basic values from MS Excel
3. Test the program code by calculation 4 examples

#### Modern method of calculating the compass error

##### Development of an algorithm for calculating the correction of a compass for the Sun

Using the explanation of the Norie's Nautical Table for parameters A, B and C, the corresponding patterns are analyzed. [2] Figure 1 below shows the algorithm for calculating TB finding on the star using the MS Excel and MATLAB environment.

Parameter A is determined by latitude and local time angle, respectively, the calculation formula:  $A = |\text{tg lat}/\text{tg LHA}|$ . Parameter B is determined by declination and local time angle, respectively, the calculation formula  $B = |\text{tg DEC}/\sin \text{LHA}|$ .

And then determine the sign of these parameters by MATLAB function sign().

#### The program code for calculating the compass error for the Sun in the MATLAB environment

```
GMTh=**; m=**; s=*; GMTm=m+s/60; % using Greenwich meridian time
lat=**.*****; %N/S
long=**.*****; %E/W
OB=***; %Observed bearing
DAY=xlsread('2022_Nautical_Almanac.xlsx','nautical_almanac','O10');
MONTH=xlsread('2022_Nautical_Almanac.xlsx','nautical_almanac','O12');
Today=datetime(2022,MONTH,DAY,GMTh,m,s)
Date1=datetime(2021,12,21,12,0,0); %winter solstice in 2021
Date2=datetime(2022,06,21,12,0,0); %summer solstice in 2022
Date3=datetime(2022,12,21,12,0,0); %winter solstice in 2022
Lastday=datetime(2022,12,31); %lastday in 2022
```

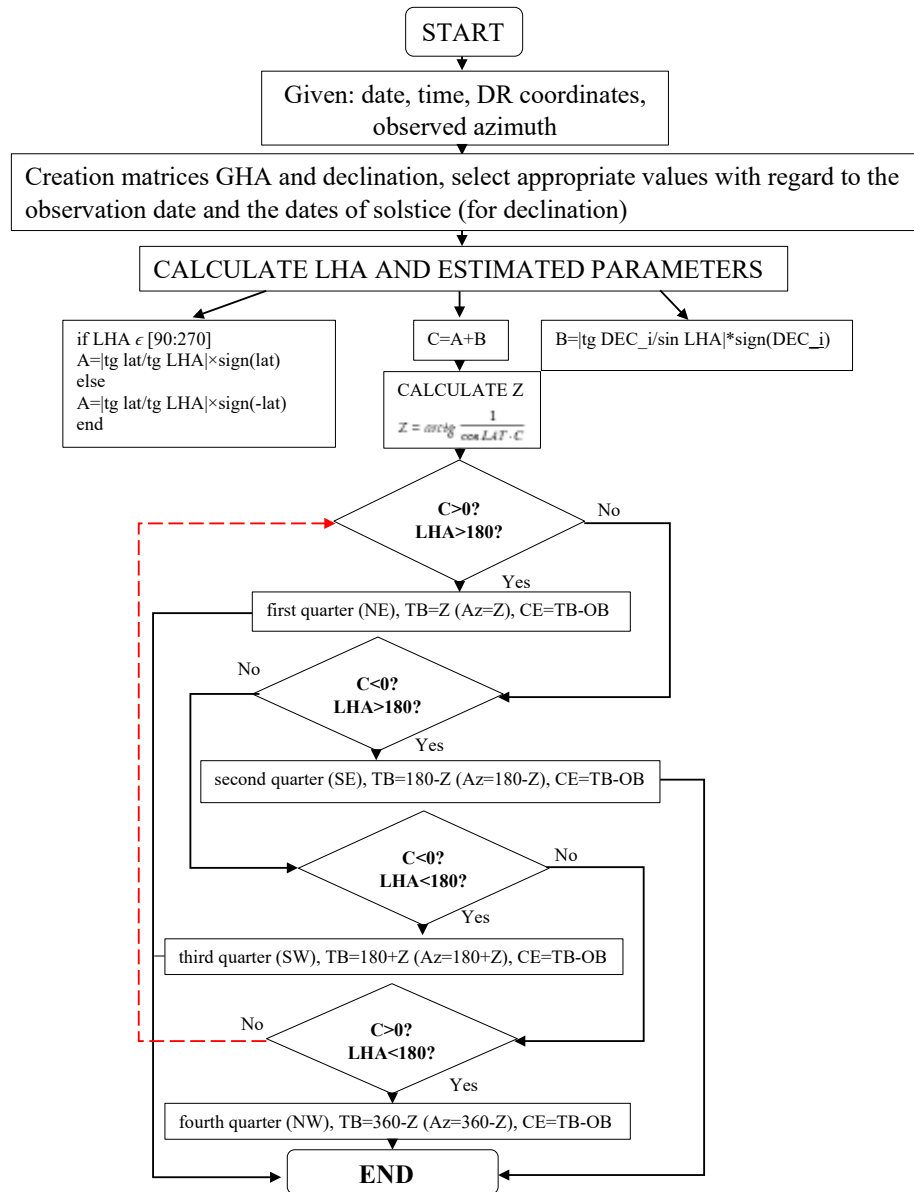


Fig. 1. CE calculation algorithm (declination selection can be simplified for other celestial bodies)

```

GHA_degrees1=xlsread('2022_Nautical_Almanac.xlsx','nautical_
almanac','C16:C21');
GHA_degrees2=xlsread('2022_Nautical_Almanac.xlsx','nautical_
almanac','C23:C28');
GHA_degrees3=xlsread('2022_Nautical_Almanac.xlsx','nautical_
almanac','C30:C35');
  
```

```
GHA_degrees4=xlsread('2022_Nautical_Almanac.xlsx','nautical_
almanac','C37:C42');
GHA_degrees5=xlsread('2022_Nautical_Almanac.xlsx','nautical_almanac','C44');
GHA_minutes1=xlsread('2022_Nautical_Almanac.xlsx','nautical_
almanac','D16:D21');
GHA_minutes2=xlsread('2022_Nautical_Almanac.xlsx','nautical_
almanac','D23:D28');
GHA_minutes3=xlsread('2022_Nautical_Almanac.xlsx','nautical_
almanac','D30:D35');
GHA_minutes4=xlsread('2022_Nautical_Almanac.xlsx','nautical_
almanac','D37:D42');
GHA_minutes5=xlsread('2022_Nautical_Almanac.xlsx','nautical_almanac','D44');
GHA=[GHA_degrees1+GHA_minutes1./60; GHA_degrees2+GHA_minutes2./60;
GHA_degrees3+GHA_minutes3./60; GHA_degrees4+GHA_minutes4./60; GHA_
degrees5+GHA_minutes5./60];
GHA_gt=GHA(GMTh+1,1) %GHA FOR GIVEN TIME
DEC_degrees1_6=xlsread('2022_Nautical_Almanac.xlsx','nautical_
almanac','G16');
DEC_degrees7_12=xlsread('2022_Nautical_Almanac.xlsx','nautical_
almanac','G23');
DEC_degrees13_18=xlsread('2022_Nautical_Almanac.xlsx','nautical_
almanac','G30');
DEC_degrees19_24=xlsread('2022_Nautical_Almanac.xlsx','nautical_
almanac','G37');
DEC_degrees25=xlsread('2022_Nautical_Almanac.xlsx','nautical_almanac','G44');
DEC_minutes1=xlsread('2022_Nautical_Almanac.xlsx','nautical_
almanac','H16:H21');
DEC_minutes2=xlsread('2022_Nautical_Almanac.xlsx','nautical_
almanac','H23:H28');
DEC_minutes3=xlsread('2022_Nautical_Almanac.xlsx','nautical_
almanac','H30:H35');
DEC_minutes4=xlsread('2022_Nautical_Almanac.xlsx','nautical_
almanac','H37:H42');
DEC_minutes5=xlsread('2022_Nautical_Almanac.xlsx','nautical_almanac','H44');
if Today>Date1 && Today<Date2
DEC=[DEC_degrees1_6-DEC_minutes1./60; DEC_degrees7_12-DEC_
minutes2./60; DEC_degrees13_18-DEC_minutes3./60; DEC_degrees19_24-DEC_
minutes4./60; DEC_degrees25-DEC_minutes5./60]; % before summer solstice
elseif Today>=Date2 && Today<Date3
DEC=[DEC_degrees1_6+DEC_minutes1./60; DEC_degrees7_12+DEC_
minutes2./60; DEC_degrees13_18+DEC_minutes3./60; DEC_degrees19_24+DEC_
minutes4./60; DEC_degrees25+DEC_minutes5./60]; % after summer solstice
elseif Today>=Date3 && Today<=Lastday
DEC=[DEC_degrees1_6-DEC_minutes1./60; DEC_degrees7_12-DEC_minutes2./60;
DEC_degrees13_18-DEC_minutes3./60; DEC_degrees19_24-DEC_minutes4./60; DEC_
degrees25-DEC_minutes5./60]; % after winter solstice
end
```

```
DEC_gt=DEC(GMTh+1,1) %DEC for given time (without minutes taking in
account)
dif_gha=(GHA(12,1)-GHA(1,1))/11
dif_dec=(DEC(25,1)-DEC(1,1))/24
if GHA_gt+dif_gha*(GMTm/60)>360 GHA_wm=GHA_gt+dif_
gha*(GMTm/60)-360
else GHA_wm=GHA_gt+dif_gha*(GMTm/60) %GHA with minutes taking in
account
end
DEC_wm=DEC_gt+dif_dec*(GMTm/60);
DEC_i=DEC_wm
if GHA_wm+long>360 LHA=GHA_wm+long-360
else LHA=GHA_wm+long %local hour angle calculation
end
if LHA >270
A=abs(tan(lat*pi/180)/tan(LHA*pi/180))*(-sign(lat))
elseif LHA<90
A=abs(tan(lat*pi/180)/tan(LHA*pi/180))*(-sign(lat))
else
A=abs(tan(lat*pi/180)/tan(LHA*pi/180))*sign(lat)
end
B=abs(tan(DEC_i*pi/180)/sin(LHA*pi/180))*sign(DEC_i)
C=A+B
Z=abs(atan(1/(cos(lat*pi/180)*C))*180/pi)
if C>0 && LHA>180 %first quarter
TB=Z
elseif C<0 && LHA>180 %second quarter
TB=180-Z
elseif C<0 && LHA<180 %third quarter
TB=180+Z
elseif C>0 && LHA<180 %fourth quarter
TB=360-Z
end
CE=TB-OB % compass error
```

Data is taken from the electronic almanac in MS Excel format (Fig. 2).

Therefore, after taking values from MS Excel MATLAB constructs matrices GHA and DEC, from which the appropriate values will be selected in CE calculations.

#### **Examples of calculating the compass error by the Sun**

Examples that given in this paragraph have same given values, but different date, to illustrate the changes of Sun declination.

##### **Example 1.**

##### **Given:**

Today = datetime 21-May-2022 04:30:24 (before summer solstice)

lat=25° N

long=156°E

OB=273°

Sun				
G.H.A.		declination		
h	°	'	°	'
0	179	19.3	-23	6.9 S
1	194	19.0		6.7
2	209	18.7		6.5
3	224	18.4		6.3
4	239	18.1		6.1
5	254	17.8		6.0
6	269	17.5	-23	5.8 S
7	284	17.2		5.6
8	299	16.9		5.4
9	314	16.6		5.2
10	329	16.3		5.0
11	344	16.0		4.9

day		31	
month		12	

meridian passage of Greenwich:  
12 h 2 m 57 s U.T.

position:  
Latit. 45° 45' N  
Long. 10° 10' W

aries				
G.H.A.				
h	°	'	°	'
0	99	24.2		
1	114	26.6		
2	129	29.1		
3	144	31.6		
4	159	34.0		
5	174	36.5		
6	189	39.0		
7	204	41.4		
8	219	43.9		
9	234	46.4		
10	249	48.8		
11	264	51.3		

Fig. 2. Nautical Almanac 2022

**Solution**

GHA<sub>gt</sub> = 240.8531  
 DEC<sub>gt</sub> = 19.8284  
 GHA<sub>wm</sub> = 248.4528  
 DEC<sub>i</sub> = 19.8242  
 LHA = 44.4528  
 A = -0.4753  
 B = 0.5148  
 C = 0.0395  
 Z = 87.9517  
 TB = 272.0483  
 CE = -0.9517

**Answer:** CE = -0.9517°.

**Example 2.**

**Given:**

lat = 25° N  
 long = 156° E  
 OB = 276°  
 Today = datetime 22-Jun-2022 04:30:24 (after summer solstice)

**Solution**

GHA<sub>gt</sub> = 239.5090  
 DEC<sub>gt</sub> = 23.4357  
 GHA<sub>wm</sub> = 247.1079  
 DEC<sub>i</sub> = 23.4356  
 LHA = 43.1079  
 A = -0.4982

B = 0.6343  
C = 0.1361  
Z = 82.9658  
TB = 277.0342  
**Answer:** CE=1.0342°

**Example 3.**

**Given:**

lat = 25°N  
long = 156°E  
OB = 225°  
Today = datetime 22-Dec-2022 04:30:24 (after winter solstice)

**Solution**

GHA\_gt = 240.4095  
DEC\_gt = -23.4378  
GHA\_wm = 248.0069  
DEC\_i = -23.4377  
A = -0.4828  
B = -0.6240  
C = -1.1068  
Z = 44.9123  
TB = 224.9123  
CE = -0.0877  
**Answer:** CE = -0.0877°

**Example 4.**

**Given:**

lat = 25° N  
long = 156° E  
Today = datetime 31-Dec-2022 04:30:24 (last day in year)  
OB=225°

**Solution**

GHA\_gt = 239.3013  
DEC\_gt = -23.4378  
GHA\_wm = 246.8987  
DEC\_i = -23.4377  
A = -0.5018  
B = -0.6369  
C = -1.1387  
Z = 44.0974  
TB = 224.0974  
CE = -0.9026  
**Answer:** CE = -0.9026°

According to the test program code is working according to algorithm, without any problem.

### Conclusions

The algorithm was created in accordance with the Norie's Nautical Tables. It can be used for other celestial bodies just by changing the value localization in function xlsread() and simplified the declination selection procedure.

The program code in MATLAB takes in account summer and winter solstice and changes of declination sign, also defines the signs of parameters A and B by latitude sign and declination sign respectively.

In article was explained how to calculate true azimuth (true bearing) according to the sign of parameter C and LHA value.

Therefore, proposed method of compass error calculation using MATLAB and MS Excel environments is very effective and can be use in marine practice.

### BIBLIOGRAPHY

1. IMO STCW inc. 2010 Manila Amendments: 2017.
2. Norie's Nautical Tables 2014 Second Edition, 572 p.
3. Electronic Nautical Almanac 2022 created by Capt. Roberto Iori. URL: <https://www.nauticalalmanac.it/en/>
4. Алексишин В.Г., Долгочуб В.Т., Белов О.В. Практическое судовождение: учебное пособие. 2 изд. Одесса : Феникс – Одесская национальная морская академия, 2006. 376 с.
5. Астрономический календарь. Постоянная часть. Изд. 7-е. М. : Наука, 1981, 704 с.
6. Бакулин П.И. и др. Курс общей астрономии. М. : Госфизматиздат, 1983. 558 с.
7. Белобров А.П. Мореходная астрономия. Л. : Гидрометиздат, 1954. 320 с.
8. Бобоков В.Ф., Крачеквич Л.Н. Мореходная астрономия. М. : Воениздат, 1975.
9. Вентцель М.К. Сферическая тригонометрия. Изд. 2-е. М. : Геодезиздат, 1948. 154 с.
10. Григорьев В.В. и др. Мореходные приборы и инструменты. М. : Транспорт, 1960.
11. Дьяконов В.Ф. Мореходная астрономия. Л. : Транспорт, 1968.
12. Каврайский В.В. Избранные труды. Том I. Астрономия и геодезия. Л. : УНГС ВМФ, 1956. 358 с.
13. Катанин В.И., Емец К.А. и др. Справочник штурмана М. : Воениздат, 1966. 504 с.
14. Кашанин В.И., Лаврентьев А.В., Скубко Р.А. Штурман флота. М. : Воениздат, 1986. 540 с.
15. Климашин И.А. Календарь и хронология. Изд. 2-е. М. : Наука, 1985. 320 с.
16. Красавцев Б.И. Мореходная астрономия. М. : Транспорт, 1968.
17. Красавцев Б.И. Мореходная астрономия. М. : Транспорт, 1978. 304 с.
18. Красавцев Б.И. Мореходная астрономия. М. : Транспорт, 1986. 256 с.
19. Красавцев Б.И. Инструменты и методы мореходной астрономии. М. : Транспорт, 1972.

20. Красавцев Б.И., Хлюстин Б.П. Мореходная астрономия. М. : Транспорт, 1960.
21. Кудрявцев В.Г. Сборник заданий и методические указания на лабораторные работы по дисциплине «Мореходная астрономия». Киев : КГАВТ, 2002. 123 с.
22. Кудрявцев В.Г., Давыдов В.С. Мореходная астрономия : учебное пособие. 3 изд. Киев : Лира-К, 2019. 380 с.
23. Михайлов В.С., Кудрявцев В.Г., Давыдов В.С. Практическая мореходная астрономия : учебник. Киев : Киевская государственная академия водного транспорта им. гетмана Петра Конашевича-Сагайдачного, 2009. 293 с.
24. Матусевич Н.Н. Основы мореходной астрономии. Л. : УНГС ВМФ, 1956. 548 с.
25. Рыбалтовский Н.Ю. Практическая мореходная астрономия. М. : Транспорт, 1964.
26. Самохвалов Д.А., Николаев Б.В. Курс кораблевождения. Том V, кн. 6. Секстаны. Измерители времени. Л. : УНГС ВМФ, 1960. 256 с.
27. Сакеллари Н.А. Мореходные инструменты. Описательный курс. М. : Воениздат, 1943. 380 с.
28. Селешников С.И. История календаря и хронология. Изд. 3-е. М. : Наука, 1977. 224 с.
29. Синяев В.А. Мореходная астрономия. Одесса : УМД ОГМА, 1999. 147 с.
30. Синяев В.А. Лукин М.Г., Кулик В.К. Задачник по мореходной астрономии. Одесса : УМА ОГМА, 1998. 220 с.
31. Скородумов П.П. Курс кораблевождения. Т 2. Мореходная астрономия. Л. : УНГС ВМФ, 1963. 528 с.
32. Скубко Р.А. Морская астронавигация. Основы астрономического ориентирования на море. Учебник. М. : Воениздат, 1979. 478 с.
33. Скубко Р.А., Филатов Н.В. Мореходная астрономия. М. : Воениздат, 1966.
34. Титов Г.Ю., Фаин Г.И. Мореходная астрономия. Т. : Транспорт, 1974. 328 с.
35. Титов Г.Ю., Фаин Г.И. Мореходная астрономия. Т. : Транспорт, 1979. 312 с.
36. Черняев Л.Ф., Лукин М.Г. и др. Задачник по мореходной астрономии. М. : Транспорт, 1984. 256 с.
37. Черняев Л.Ф., Лукин М.Г. и др. Мореходная астрономия. Обзорные лекции по курсу мореходной астрономии для заочных факультетов судоводительской специальности. ВИИМУ ММФ. Одесса : ОВИМУ, 1971. 75 с.
38. Черняев Л.Ф., Данилов В.И. Мореходная астрономия. Обзорные лекции по курсу мореходной астрономии для заочных факультетов судоводительской специальности. ВИИМУ ММФ. Одесса : ОВИМУ, 1974. 92 с.

39. Рекомендации по астронавигационному ориентированию при плавании с поврежденными техническими средствами навигации и на спасательных средствах (№ 9049). ГУНиО МО, 1983. 54 с.

#### REFERENCES

1. IMO STCW inc. 2010 Manila Amendments: 2017.
2. Norie's Nautical Tables 2014 Second Edition, 572 p.
3. Electronic Nautical Almanac 2022 created by Capt. Roberto. URL: <https://www.nauticalalmanac.it/en/>
4. Aleksishin V.G., Dolgochub V.T., Belov O.V. Practical navigation : educational allowance. 2nd ed. [Praktycheskoe sudovozhdenye : uchebnoe posobyе. 2 izd]. Odessa: Phoenix – Odessa national maritime Academy, 2006. 376 p.
5. Astronomical calendar. Constant part. Ed. 7th [Astronomycheskyi kalendar. Postoiannaia chast. Izd. 7-e]. M. : Nauka, 1981. 704 p.
6. Bakulin P.I. etc. General course of astronomy [Kurs obshchei astronomyy]. M. : Gosfizmatizdat, 1983. 558 p.
7. Belobrov A.P. Nautical astronomy [Morekhodnaia astronomyia]. L. : Gidrometizdat, 1954. 320 p.
8. Bobokov V.F., Krachkevich L.N. Nautical astronomy [Morekhodnaia astronomyia]. M. : Military Publishing House, 1975.
9. Wentzel M.K. spherical trigonometry. Ed. 2nd. [Sferycheskaia tryhonometryia. Izd. 2-e]. M. : Geodesizdat, 1948. 154 p.
10. Grigoriev V.V. etc. Seaworthy appliances and tools [Morekhodnye prybory y ynstrumenty]. M. : T transport, 1960.
11. Dyakonov V.F. Nautical astronomy [Morekhodnaia astronomyia]. L. : Transport, 1968.
12. Kavraysky V.V. Favorites works. Volume I. Astronomy and Geodesy [Izbrannye trudy. Tom I. Astronomyia y heodezyia]. L. : UNGS Navy, 1956. 358 p.
13. Katanin V.I., Yemets K.A. etc. Navigator's Handbook [Spravochnyk shturmana]. M. : Military Publishing House, 1966. 504 p.
14. Kashanin V.I., Lavrentiev A.V., Skubko R.A. Fleet navigator [Shturman flota]. M. : Voenizdat, 1986. 540 p.
15. Klimashin I.A. Calendar and Chronology. Ed. 2nd [Kalendar y khronolohyia. Izd. 2]. M. : Science, 1985. 320 p.
16. Krasavtsev B.I. Nautical astronomy [Morekhodnaia astronomyia]. M. : Transport, 1968.
17. Krasavtsev B.I. Nautical astronomy [Morekhodnaia astronomyia]. M. : Transport, 1978. 304 p.
18. Krasavtsev B.I. Nautical astronomy [Morekhodnaia astronomyia]. M. : Transport, 1986. 256 p.
19. Krasavtsev B.I. Tools and methods seaworthy astronomy [Instrumenty y metody morekhodnoi astronomyy]. – M., Transport, 1972.

20. Krasavtsev B.I., Khlyustin B.P. Nautical astronomy [Morekhodnaia astronomyia]. M. : Transport, 1960.
21. Kudryavtsev V.G. Collection of tasks and methodical instructions for laboratory work on the discipline "Nautical astronomy" [Sbornyk zadanyi y metodycheskye ukazaniya na laboratornye raboty po dystsyplyne «Morekhodnaia astronomyia»]. Kiev : KGAVT, 2002. 123 p.
22. Kudryavtsev V.G., Davydov V.S. Nautical astronomy : educational allowance. 3rd ed [Morekhodnaia astronomyia : uchebnoe posobyе. 3 izd.]. Kiev : Lira-K, 2019. 380 p.
23. Mikhailov V.S., Kudryavtsev V.G., Davydov V.S. Practical nautical astronomy : textbook [Praktycheskaia morekhodnaia astronomyia : uchebnyk]. Kiev : Kievskaya state academy of water transport them. Hetman Petro Konashevich-Sagaydachny, 2009. 293 p.
24. Matusevich N.N. Basics seaworthy astronomy [Osnovy morekhodnoi astronomyy]. L. : UNGS Navy, 1956. 548 p.
25. Rybaltovsky N.Yu. Practical nautical astronomy [Praktycheskaia morekhodnaia astronomyia]. M. : Transport, 1964.
26. Samokhvalov D.A., Nikolaev B.V. Navigation course. Volume V, book. 6. Sextants. Meters time [Kurs korablevozhdenyia. Tom V, kn. 6. Sekstany. Izmyertely vremeny]. L. : UNGS VMF, 1960. 256 p.
27. Sakellari N.A. Seaworthy tools. Descriptive course [Morekhodnye instrumenty. Opisatelnyi kurs]. M. : Military Publishing, 1943. 380 p.
28. Seleshnikov S.I. Calendar History and Chronology. Ed. 3rd [Ystoryia kalendara y khronolohyia. Yzd. 3-e]. M. : Nauka, 1977. 224 p.
29. Sinyaev V.A. Nautical astronomy [Morekhodnaia astronomyia]. Odessa : UMD OGMA, 1999. 147 p.
30. Sinyaev V.A. Lukin M.G., Kulik V.K. Nautical problem book astronomy [Zadachnyk po morekhodnoi astronomyy]. Odessa : UMA OGMA, 1998. 220 p.
31. Skorodumov P.P. Navigation course. T 2. Nautical astronomy [Kurs korablevozhdenyia. T 2. Morekhodnaia astronomyia]. L. : UNGS Navy, 1963. 528 p.
32. Skubko R.A. Maritime celestial navigation. Basics astronomical sea orientation. Textbook [Morskaia astronavyhatsyia. Osnovy astronomycheskoho oryentyrovaniya na more. Uchebnyk]. M. : Military Publishing, 1979. 478 p.
33. Skubko R.A., Filatov N.V. Nautical astronomy [Morekhodnaia astronomyia]. M. : Military Publishing House, 1966.
34. Titov G.Yu., Fain G.I. Nautical astronomy [Morekhodnaia astronomyia]. M. : Transport, 1974. 328 p.
35. Titov G.Yu., Fain G.I. Morekhodnaya astronomy [Morekhodnaia astronomyia]. M. : Transport, 1979. 312 p.
36. Chernyaev L.F., Lukin M.G. etc. Nautical problem book astronomy [Zadachnyk po morekhodnoi astronomyy]. M. : Transport, 1984. 256 p.

37. Chernyaev L.F., Lukin M.G. etc. Nautical astronomy. Overview lectures on the course of nautical astronomy for correspondence faculties navigational specialties [Morekhodnaia astronomiya. Obzornye lektsyy po kursu morekhodnoi astronomyy dlia zaочnykh fakultetov sudovodytelskoi spetsyalnosti VIIMU MMF]. Odessa : OVIMU, 1971. 75 p.
38. Chernyaev L.F., Danilov V.I. Nautical astronomy. Overview lectures on the course of nautical astronomy for correspondence faculties navigational specialty [Morekhodnaia astronomiya. Obzornye lektsyy po kursu morekhodnoi astronomyy dlia zaочnykh fakultetov sudovodytelskoi spetsyalnosti VYUM MMF]. 1974, 92 p.
39. Recommendations for celestial navigation orienteering when swimming with damaged technical means navigation and rescue funds (No. 9049) [Rekomendatsyy po astronavyhatsyonnomu oryentyrovanyiu pry plavanny s povrezhdennymy tekhnicheskymy sredstvamy navyhatsyy i na spasatelnykh sredstvakh (№ 9049)]. GUNiO MO, 1983. 54 p.

## СУТНІСТЬ, ПЕРЕВАГИ ТА ІСНУЮЧИЙ ДОСВІД РОЗВИТКУ РОЗУМНИХ ПОРТІВ

Д.М. Решетков<sup>1</sup>, М.А. Бондарюк<sup>2</sup>, С.П. Онищенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., професор, професор кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт»,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0001-7281-962X

<sup>2</sup>директор,

ТОВ «Металзюкраїн корп лтд», Одеса, Україна

<sup>3</sup>д.е.н., професор, професор кафедри «Експлуатація флоту і технологія  
морських перевезень»,

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-7528-4939

### Анотація

**Вступ.** Розумний порт використовує передові технології для автоматизації операцій та покращення логістики: штучний інтелект, великі дані, Інтернет речей та блокчейн. Використання таких технологій знижує кількість аварій, підвищує продуктивність та знижує експлуатаційні витрати. А це призводить до підвищення економічної ефективності та якості обслуговування, що сприяє підвищенню конкурентоспроможності. **Результати.** Не дивлячись на те, що більшість портів впроваджують автоматизацію та інформатизацію для покращення процедур та операцій, проте лише деякі з використанням функцій інтелектуальних портів. Аналіз джерел дозволяє виділити основні проблеми, з якими стикаються порти на шляху до того, щоб стати розумними портами. Розумні порти можна розглядати як порти, які автономно виконують портові операції та оптимізують логістичні потоки, застосовуючи нові та передові технології. Інтелектуальний порт можна визначити як порт, який займається автоматизацією портових споруд та стає автономним портом з інтегрованим управлінням інформацією, раціональним прийняттям рішень та ефективним використанням ресурсів за допомогою технологій 4IR. У даному дослідженні охарактеризовано сутність «розумних» портів, встановлено основні переваги та труднощі у процесі трансформації портів у розумні порти. Узагальнення існуючого досвіду формування розумних портів дозволяє створити перші кроки у розробці теоретичної бази для розвитку портів у даному напрямку. Встановлено основні етапи трансформації портів у розумні. **Висновки.** Україні необхідно заздалегідь розробити дорожню карту та забезпечити необхідний бюджет та ресурси для створення розумних портів на державному рівні. Перехід до «розумних» портів з метою впровадження інновацій за допомогою автоматизації та інтелектуальних систем портових операцій є особливо доцільним для України, яка прагне підвищити продуктивність та конкурентоспроможність на міжнародному рівні.

**Ключові слова:** розумний порт, трансформація, підвищення ефективності, штучний інтелект, безпека.

ESSENCE, ADVANTAGES AND EXISTING EXPERIENCE  
OF THE SMART PORTS DEVELOPMENT

D.M. Reshetkov<sup>1</sup>, M.A. Bondaryuk<sup>2</sup>, S.P. Onyshchenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Candidate of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department  
“Port Operations and Cargo Handling Technology”,  
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0001-7281-962X

<sup>2</sup>Director,

“MetalsUkrain Corp Ltd”, Odesa, Ukraine

<sup>3</sup>Doctor of Economics, Professor, Professor of the Department  
“Fleet Operations and Shipping Technology”,  
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-7528-4939

**Summary**

**Introduction.** The smart port uses advanced technologies to automate operations and improve logistics: artificial intelligence, big data, the Internet of Things and blockchain. The use of such technologies reduces the accidents, increases productivity and lowers operating costs. This leads to an increase in economic efficiency and quality of service, which contributes to an increase in competitiveness. **Results.** Although most ports are implementing automation and informatization to improve procedures and operations, only a few are using smart port functions. Analyze the sources allows to highlight the main challenges that ports face on the way to becoming smart ports. Smart ports can be considered as ports that autonomously perform port operations and optimize logistics by applying advanced technologies. An intelligent port can be defined as a port that is engaged in the automation of port facilities and becomes an autonomous port with integrated information management, rational decision-making and efficient use of resources with the 4IR technologies. This study characterizes the essence of "smart" ports, identifies the main advantages and difficulties in the transforming process of ports into smart ports. The generalization of the existing experience in the formation of smart ports creates the first stage in the theoretical base for the ports development in this direction. The main stages of the transformation of ports into smart ones have been established. **Conclusions.** Ukraine needs a road map for the smart ports' creation of the state level. The transition to "smart" ports to innovate through automation and intelligent port operations systems is relevant for Ukrainian ports to increase productivity and competitiveness at the international level.

**Key words:** smart port, transformation, efficiency improvement, artificial intelligence, security.

**Вступ.** Портова сфера постійно перебуває у стані розвитку, і якщо раніше основний акцент у розвитку портів набував у логістичному чи технологічному контексті, то останні роки саме інформаційні, а якщо точніше, інтелектуальні технології формують платформу для сучасного порту та його ефективного функціонування. Тому й з'явилося поняття «інтелектуальний порт». Інтелектуальний (розумний) порт - це автоматизований порт, який використовує аналітику даних для прийняття найкращих можливих рішень та ефективного виконання усіх операцій. Такий порт вважається ефективнішим, продуктивнішим і конкурентоспроможнішим [1].

Розумний порт використовує передові технології для автоматизації операцій та покращення логістики: штучний інтелект, великі дані, Інтернет речей та блокчейн. Використання таких технологій знижує кількість аварій, підвищує продуктивність та знижує експлуатаційні витрати. А це призводить до підвищення економічної ефективності та якості обслуговування, що сприяє підвищенню конкурентоспроможності. Також інші переваги включають скорочення часу очікування вантажних операцій, покращення відстеження, пропускну спроможності та навіть допомогу у спрощенні митних процедур.

Розробка інтелектуального порту виходить за рамки простого впровадження та застосування передових технологій. Дані порти вимагають інтеграції інформації, конвергенції систем та взаємозв'язку між різними системами, обладнанням, об'єктами та бізнес-об'єктами [2]. Це вимагає співробітництва та партнерських відносин з багатьма зацікавленими сторонами, такими як операторами портів, судновласниками та вантажовласниками.

**Постановка проблеми.** На даний час не існує універсального підходу до розробки інтелектуальних портів, оскільки технологічний рівень і продуктивність портів індивідуальні, тому необхідно застосовувати індивідуальний підхід до визначення напрямків та оцінки ризиків застосування інтелектуальних портових систем.

Використання передового досвіду в цій галузі дозволить портам України швидше перейти у своїй роботі на найкращі світові стандарти та сприятиме їхньому стійкому розвитку [3]. Тому вивчення існуючого досвіду у впровадженні інтелектуальних систем та трансформації портів у розумні порти є актуальною науковою проблемою, яка має як теоретичну так і практичну значущість.

Слід зазначити, що на даний час достатня кількість публікацій присвячена проблемам розвитку та функціонування розумних портів, але ж більшість з них описують проблеми конкретних портів та передумови їх трансформації у розумні порти (наприклад [4-8]). Деякі публікації розглядають технологічні аспекти функціонування розумних портів (наприклад, [9-11]), або цифровізацію морського бізнесу та логістики взагалі ([12-14]). Узагальнення існуючого досвіду та встановлення переваг, які надають розумні порти, та основних викликів, з якими зустрічаються порти на шляху їх цифровізації, є необхідним для формування перших етапів теоретичної бази розвитку розумних портів.

**Ціль статті.** Тому метою даного дослідження є узагальнення існуючого досвіду трансформації морських торговельних портів у розумні (інтелектуальні) порти та встановлення основних завдань функціонування та переваг таких портів.

**Цілі та умови сталого розвитку морських портів згідно концепції «розумний порт».** Згідно з Інструментарієм портової реформи Світового банку РРІАФЗ [15], очікується, що п'ять таких чинників вплинуть на порти у майбутньому (табл. 1).

Таким чином перед портами стоїть завдання підвищення ефективності та продуктивності при одночасному забезпеченні безпечного робочого середовища та мінімізації шкоди довкіллю, отже, ефективність, конкурентоспроможність, безпека, надійність, екологічність, інклюзивність [16] – основні вимоги до портів у майбутньому. Наприклад, автоматизація портів за допомогою рішень, заснованих на технології четвертої промислової революції (4IR), таких як 5G, штучний інтелект, радарні датчики, забезпечують безпечне робоче середовище при одночасному підвищенні ефективності та продуктивності. Іншим прикладом є цифрові двійники, що використовують віртуальну реальність та великі дані, які можуть знизити витрати на будівництво та експлуатацію, а також скоротити кількість помилок внаслідок впливу людського фактору [17].

Таблиця 1

**Основні фактори впливу на порти у майбутньому (згідно [15])**

Фактори впливу		Сутність
1	Посилення глобальної конкуренції	Зростання обсягу міжнародної торгівлі та подальше зростання глобалізації виробництва, розширення географічного масштабу глобальних логістичних система та логістичної досяжності
2	Нові технології	Необхідність підвищення продуктивності контейнерних терміналів та зростаюча роль інформаційних/інтелектуальних технологій
3	Зміна моделей систем розподілу	Пошук стратегічних центрів. Отримання доходу перевалочного вузла з допомогою подвійний обробки контейнерів. Внутрішні контейнерні термінали замінюють діяльність порту, підвищення інтермодальної ефективності
4	Зростаюче значення питань охорони довкілля та охорони праці	Необхідність створення безпечної та екологічно чистої, низьковуглецевої системи судноплавства, у тому числі, портової складової
5	Зміна позиції зацікавлених сторін	Консолідація серед морських перевізників та поява глобального середовища постачальників логістичних послуг

Не дивлячись на то, що більшість портів впроваджують автоматизацію та інформатизацію для покращення процедур та операцій, проте лише деякі з використанням функцій інтелектуальних портів. Аналіз джерел дозволяє виділити основні проблеми, з якими стикаються порти на шляху до того, щоб стати розумними портами (табл. 2).

Таблиця 2

**Проблеми розвитку «розумних» портів (узагальнення [3-5, 16])**

Проблема		Зміст проблеми
1	Збільшення розмірів суден	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Проблеми структурних змін портів для прийому великих суден</li> <li>• Необхідність максимізувати ефективність портових операцій для обробки суден значного розміру</li> <li>• Необхідність покращення портової інфраструктури, операцій, об'єктів та транспортних засобів</li> </ul>
2	Необхідність підвищення ефективності портових операцій	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Необхідність оптимізації портових та термінальних процесів для обробки збільшених обсягів вантажів</li> <li>• Необхідність відстеження вантажів у режимі реального часу для оптимізації портових операцій та забезпечення наскрізної видимості</li> <li>• Підвищення ефективності та продуктивності праці в порту або на терміналі</li> </ul>
3	Обмеження в обслуговуванні на вимогу	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Поточний стан портів не в змозі врахувати швидкі зміни серед портів та вимог користувачів</li> <li>• Відсутність можливості впоратися з безлюдними процесами за участю автоматизації, робототехніки та інтернету речей</li> <li>• Необхідність розширення зони контролю за рахунок використання віддаленого моніторингу</li> </ul>
4	Обмеження сумісності з іншими транспортними засобами	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Інформація про морську логістику потребує взаємозв'язків з іншими видами транспорту</li> <li>• Необхідність обміну інформацією з іншими транспортними системи та взаємозв'язок з внутрішнім транспортом</li> </ul>

Продовження таблиці 2

Проблема		Зміст проблеми
5	Вплив на довкілля	<ul style="list-style-type: none"><li>• Екологічні проблеми, викликані діяльністю портів, судновими та портовими відходами, нафтовими відходами та стічними водами</li><li>• Необхідність будівництва екологічно чистого порту, який використовує екологічно чисту енергію або green технології</li><li>• Необхідність скорочення викидів CO<sub>2</sub></li></ul>
6	Необхідність посилення фізичної та кібербезпеки в портах	<ul style="list-style-type: none"><li>• Необхідність забезпечення безпеки у широкому сенсі, оскільки порт є великим географічним пунктом, де зберігаються небезпечні вантажі (у тому числі вибухові речовини, хімічні речовини)</li><li>• Необхідність чітко визначеної політики кібербезпеки портів від кібератак</li></ul>

З 2000 року до теперішнього часу морські порти почали вдосконалювати свої операційні системи, маючи у якості мети прагнення стати «розумними портами». Нове бачення інтелектуального порту базується на інтелектуальних та інноваційних технологіях з низьким впливом на навколишнє середовище.

Підхід «розумний порт» може вплинути на загальну екосистему морського порту за рахунок безперервного збирання інформації про діяльність морського порту з використанням Інтернету речей та прийняття рішень з використанням технологій штучного інтелекту та великих даних. Цей підхід може забезпечити стійку систему зберігання даних та дозволити різним організаціям отримувати доступ до відповідних даних на основі узгодженої моделі управління, яка допоможе оптимізувати операційні системи та підвищити ефективність [3]. У [13] визначення концепції «розумного порту» зосереджено на трьох основних сферах: експлуатація, використання енергії та навколишнє середовище. Важливість споживання енергії в морських портах пов'язана з високими потребами в енергії для портових операцій. Ефективне використання енергії є проблемою для портів, оскільки збільшення споживання енергії означає збільшення викидів вуглецю та збільшення експлуатаційних витрат. Другим елементом визначення інтелектуального порту є екологічний аспект. Різні ініціативи, такі як ECOPORT, PRISM та GREEN Efforts, спрямовані на визначення та встановлення показників екологічної ефективності для портової влади, щоб допомогти їм зменшити та усунути вплив на навколишнє середовище.

Третій напрямок концепції розумного морського порту – операції (експлуатація). Основними операціями в порту є навантаження та вивантаження вантажів із суден на склади тощо. У ланцюжку поставок операційних систем у морських портах можна оптимізувати кілька областей підвищення ефективності і результативності портових операцій, що допоможе скоротити витрати, час та трудовитрати [4].

**Основні можливості та переваги розумних портів.** Розумні порти можна розглядати як порти, які автономно виконують портові операції та оптимізують логістичні потоки, застосовуючи нові та передові технології. Таким чином, інтелектуальний порт можна визначити як порт, який займається автоматизацією портових споруд та стає автономним портом з інтегрованим управлінням інформацією, раціональним прийняттям рішень та ефективним використанням ресурсів за допомогою

технологій 4IR. Іншими словами, це порт, який оптимізує свою діяльність за рахунок застосування передових технологій та покращення бізнес-процесів, тим самим знижуючи витрати та час обробки, підвищуючи продуктивність та ефективність порту та зводячи до мінімуму вплив на навколишнє середовище (рис. 1).

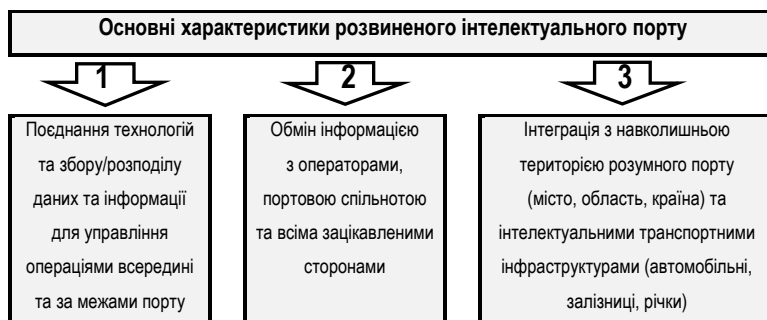


Рис. 1. Основні характеристики розвинутого інтелектуального порту

Мета інтелектуальних портів – задовольнити потреби користувачів порту, забезпечивши більш високу ефективність роботи, прозорість, безпеку та захищеність у відповідності до генеральної лінії розвитку та функціонування системи судноплавства у цілому [18-20] (табл. 3).

Таблиця 3

**Конкретні переваги, які зацікавлені сторони можуть отримати за допомогою інтелектуального порту (узагальнення [1-15])**

<b>Переваги</b>	
<b>1</b>	Прискорення транзитного часу обробки вантажів за рахунок покращення портових операцій
<b>2</b>	Скорочення витрат та часу на обробку вантажу
<b>3</b>	Прискорення часу відповіді зацікавлених сторін своїм клієнтам
<b>4</b>	Скорочення паперового потоку за рахунок електронного обміну інформацією
<b>5</b>	Покращення відстеження та операційної ефективності
<b>6</b>	Оптимізація пов'язаних з портом процесів, такі як навантаження, розвантаження, укладання або зберігання тощо
<b>7</b>	Сприяння спрощеному робочому процесу
<b>8</b>	Надання клієнтам оперативних даних про статус вантажу, робочий стан портових споруд
<b>9</b>	Здатність надавати послуги на запит за допомогою аналізу великих даних
<b>10</b>	Поліпшення планування причалів, перевантажувального обладнання, умов зберігання
<b>11</b>	Виявлення різних ризиків на морському транспорті, таких як несприятливі погодні умови або високі рівні забруднення
<b>12</b>	Поліпшення та оптимізація внутрішньої та зовнішньої співпраці

Розумні порти більш ефективні, інноваційні та орієнтовані на послуги користувачів, що дозволяє їм використовувати всі наявні у них можливості та ресурси для сталого управління операціями та портовими послугами. Такі порти стануть постійно стійкими та конкурентоспроможними при ефективному управлінні [5].

### **Найкращі світові практики у розробці інтелектуальних портів.**

**Китай.** Китай просуває пілотні проекти щодо будівництва інтелектуальних портів в 11 портах на державному рівні в чотирьох областях, включаючи інтелектуальну роботу портів, покращення управління безпекою, інтеграцію логістики та інновації бізнес-моделей. Зокрема, уряд розробляє повну автоматизацію цільових портів, таких як Сямень, Ціндао та Шанхай, з метою зробити їх найкращими у світі в секторі інтелектуальних портових операцій.

Для створення стабільних та ефективних інтелектуальних портів планується просувати інтелектуальні порти шляхом заохочення розвитку технологій, стимулювання участі уряду і приватного сектору та узгодження з портовою галуззю як поетапний підхід.

**Німеччина (Гамбург).** Управління порту Гамбург запустило власний проєкт SmartPORT. Проєкт складається з двох аспектів – «smartPORT логістика» та «SmartPORT енергетика» [21].

«SmartPORT логістика» поєднує в собі економічні та екологічні аспекти у трьох підсекторах: транспортний потік, інфраструктура та товарний потік. Певна інтелектуальна мережа є попередньою умовою для ефективного транспорту та потоку товарів за рахунок: а) використання оптимального збору даних та швидкого обміну інформацією; та б) надання перевізникам та агентам можливості обирати найбільш ефективні транспортні засоби для транспортування своїх товарів.

Енергетичний аспект SmartPORT зосереджений на трьох основних сферах: відновлюваних джерелах енергії, енергоефективності та мобільності. Завдяки «SmartPORT енергії» є можливість обмежити залежність порту від електроенергії, що виробляється традиційними способами, а також скоротити викиди та зменшити витрати.

Завдяки системі, в якій всі пов'язані з портом ресурси, такі як судна, вантажні автомобілі, крани, транспортні потоки, робоча сила і т. д., інтегровані в режимі реального часу, вартість експлуатації порту знижується на 75% та пропускна спроможність порту зростає на 15%

**Сінгапур (ТУАС).** Порт TUAS у Сінгапурі – це проєкт розумного мегапорту, який планується завершити до 2040 року. Він реалізується у чотири етапи. Після завершення він зможе обробляти до 6,5 млн. контейнерів TEU на рік [22]. TUAS – це порт, який був побудований з метою стати повністю автоматизованим та розвивається з метою одночасної реалізації інтелектуальних технологій, таких як екологічно чисті технології, безпілотники та технології відстеження суден, а також роботизовані технології для термінальних логістичних систем.

У майбутньому оптимальне портове обслуговування дозволить скоротити затримки та час очікування суден за рахунок використання системи своєчасного прибуття. Порт Сінгапур покращив наземні операції за допомогою своїх внутрішніх терміналів та складів порожніх контейнерів з використанням інтелектуальних технологій та покращив логістику вантажівок, що прибувають за допомогою відповідних систем моніторингу. Порт також використовує глобальну систему позиціонування (GPS) для моніторингу руху на під'їзних коліях до порту.

Наступний етап – це створення digital PORT, що дозволить оптимізувати портові ресурси та підвищити ефективність за рахунок використання штучного інтелекту,

що забезпечить своєчасність операцій у процесах проходження суден. Портал digital PORT також зможе обмінюватися даними із системами портової спільноти, такими як Portnet та Jurong Port Online, для отримання відповідної інформації, включаючи декларування операцій із небезпечними вантажами на портових терміналах.

**Нідерланди (Роттердам).** Нідерланди — перша країна у світі, яка успішно зробила автоматичний термінал без участі людини. Дорожня карта «розумного порту» порту Роттердам включає три основні напрямки: продумана логістика (зробити порт Роттердам лідером розумної логістики; забезпечення стійкості, надійності та ефективності ланцюжків поставок; акцент на ринку контейнерів), «розумна» енергетика та промисловість (акцент на оптимально працюючому та стійкому нафтохімічному кластері, дослідження з впровадження стійкої енергетики у багатьох відношеннях, таких як виробництво, використання та зберігання), а також перспективна портова інфраструктура (оптимізація доданої вартості портової території за рахунок морської інфраструктури та водних шляхів; будівництво та розвиток портів з метою зниження шкоди природі та навколишньому середовищі, людям та підприємствам). Коли будівництво цієї системи буде завершено, очікується, що порт Роттердам стане першим у світі портом зі штучним інтелектом.

**Сполучені Штати Америки.** Порт Саванна застосував технологію автоматизації процесів у своїй діяльності після встановлення автоматизованої системи управління активами терміналу (ATAMS) у 2008 році. ATAMS покращив процес передачі контейнерів та дозволив бути автоматично виявлені та ідентифіковані. Термінал у порту Х'юстон має можливості електронного обміну даними (EDI), включаючи комп'ютеризовані системи керування запасами. Ці системи можуть бути включені для відстеження розташування та стану окремих контейнерів. Порт Окленд має всеосяжне цифрове представлення, веб-портал, який надає інформацію про термінали, вантажі та контейнерні судна на одній платформі без необхідності переглядати декілька веб-сайтів. Портал поєднує дані з ключових морських терміналів, включаючи статус вантажу, зображення з камер у реальному часі та розклад суден. Інші додаткові функції включають оплату термінальних зборів, зустрічі з далекобійниками та оновлення статусу вантажу [2].

Аналіз інформації про підготовку національних проектів розвитку розумних портів дозволяє виділити виникаючі проблеми та дії, які вимагають підтримки (табл. 4).

**Технічна стратегія для розумних портів.** Порти є складним операційним середовищем, що складається з різних зацікавлених сторін, яким необхідно працювати разом, щоб максимізувати ефективність всього ланцюжка поставок. Оцифрування портів також є складним завданням, і зацікавлені сторони мають працювати разом, оскільки мають тісні відносини. Саме тому вкрай потрібний покроковий підхід до впровадження інтелектуальних портів [6].

На рис. 2 показано етапи реалізації стратегії технології інтелектуальних портів згідно з аналізом Boston Consulting Group (BCG). Ці кроки аналогічні покроковому підходу, що використовується для розробки загальної системи. У цьому звіті пропонується бізнес-стратегія та технічна стратегія.

По-перше, на етапі «попереднього планування» визначається стратегія розумних портів країни відповідно до національної стратегії розвитку портів. Інакше кажучи, країна має заздалегідь визначити генеральний план чи дорожню карту

розвитку порту. Потім слід розробити стратегію «розумного порту» у цій країні відповідно до певної дорожньої карти або генерального плану. По-друге, етап «план» включає перевірку поточного середовища, системи та об'єктів портового бізнесу (включаючи портові операції), а також розробку плану і графіка проекту для будівництва розумного порту.

Таблиця 4

**Проблеми, які виникають у ході підготовки національних проектів розвитку розумних портів, та відповідні дії (узагальнення [7-12])**

Проблеми	Дії
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Неєфективність, що зберігається</li> <li>• Складність забезпечення точності даних через недостатність інформаційних систем</li> <li>• Недостатній рівень зв'язків з інформаційними системами інших організацій</li> <li>• Необхідність розробки продуманої стратегії будівництва порту та детального плану</li> <li>• Необхідність посилення кадрового потенціалу порту</li> <li>• Необхідність забезпечення фінансування з національного бюджету</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Захищати та обмінюватися інформацією про передовий досвід для інтелектуальних портів</li> <li>• Організувати семінари з нарощування потенціалу для зміцнення потенціалу та технічних навичок портового персоналу</li> <li>• Встановити міцні відносини з міжнародними організаціями</li> <li>• Стандартизація бізнесу, правил та технологій, необхідних для інтелектуальних портів</li> <li>• Підготовка дослідницьких проектів або консультативних послуг для інтелектуальних портів</li> <li>• Підготовка пілотних проектів про те, як саме розвивати розумні порти на рівні держави</li> </ul>

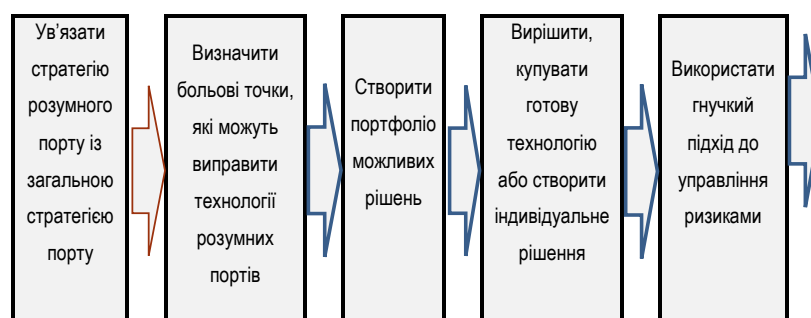


Рис. 2. Етапи реалізації технічної стратегії розумних портів

По-третє, етап «аналіз» збирає інформацію та аналізує проблеми та вимоги поточного порту. Після аналізу викликів, проблем та вимог, які потребують покращення, можна знайти джерела проблем та прогалини. Більшість проблем є або структурними, що належать до якоїсь частини фізичної операції, або поведінковими, викликаними тим, що користувачі порту вважають за краще робити щось певним чином. По-четверте, на етапі «дизайн» розробляється модель ТО-ВЕ для створення інтелектуальних портів і докладно визначаються функції [7].

**Вимірювання впливу переходу на інтелектуальні порти.** Розумні порти можуть забезпечити численні переваги підвищення конкурентоспроможності

морської логістики, і навіть підвищення загальної ефективності управління ланцюжками поставок [8]. Очікується наступні результати переходу на «розумні порти», які слід вимірювати в рамках відстеження впливу реформ (табл. 5).

Таблиця 5

**Відстеження впливу розробки інтелектуальних портів (узагальнення [5-11])**

Економічні показники	Соціальні показники	Екологічні показники
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Підвищення конкурентоспроможності країни чи портів шляхом обміну інформацією про порти між зацікавленими сторонами, сферою морської логістики чи транскордонними країнами тощо</li> <li>• Забезпечення зв'язності всіх ресурсів (вантажів, людей, обладнання, об'єктів тощо) у порту та зовнішніх ресурсів (суден, зовнішніх вантажівок, мостів, трафіку тощо) поза порту</li> <li>• Внесок не тільки у утримання існуючих клієнтів, але й залучення нових клієнтів за рахунок підвищення рівня задоволеності</li> <li>• Підвищення надійності портових послуг внаслідок розширення можливостей щодо запобігання</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Можливість прогнозування та запобігання аваріям</li> <li>• Технологія швидкого реагування під час підготовки до стихійних лих, таких як землетруси, епідемії та страйки</li> <li>• Можливість забезпечити видимість ресурсів у порту, а також надійність даних про бізнес-транзакції, наприклад, за допомогою кібербезпеки порту або технології блокчейн</li> <li>• Виключення ризику нещасних випадків на виробництві портовиків за рахунок впровадження в порту безпілотної автоматки</li> <li>• Запобігання аваріям з використанням автоматизації роботи, з використанням дистанційного керування, безпілотних систем, роботів, штучного інтелекту</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Зниження впливу роботи порту на довкілля за рахунок підвищення ефективності його роботи</li> <li>• Скорочення заторів у портах та терміналах та пов'язаних з ними викидів за рахунок мінімізації часу очікування суден та вантажівок</li> <li>• Підтримка більшої інтермодальної інтеграції на користь більш екологічно безпечного поділу за видами транспорту у повідомленні портів із внутрішніми районами</li> <li>• Зниження ризиків екологічних збитків, спричинених порушеннями безпеки в портах</li> <li>• Скорочення викидів парникових газів за рахунок оптимізації внутрішньооб'єктового транспорту та вантажно-розвантажувальних робіт</li> <li>• Оптимізація розміщення обладнання та зниження енергоспоживання</li> </ul>

Багато з певних ESPO пріоритетів є актуальними і для української портової галузі. Частина з них уже прописано у програмі «Ukrainian Ports are Going Green» розробленої фахівцями Адміністрації морських портів України [23]. Інші знайшли відображення у Білій книзі (White Paper) пріоритетів у морській галузі, яку підготував комітет з логістики Європейської бізнес-асоціації [2].

У Стратегії розвитку морських портів України на період до 2038 року передбачено «впровадження смарт-інфраструктури (новітніх технологій, що сприяють автоматизації та роботизації перевантажувальних процесів морських терміналів), екологічно безпечних технологій, спрямованих на зменшення шкідливих викидів від виробничих процесів у портах та отримання енергії з альтернативних джерел» [23].

У результаті забезпечення збалансованого розвитку та ефективного використання портових потужностей на інноваційній основі очікується стійке функціонування морських портів України відповідно до концепцій «смарт-порт» (застосування новітніх технологій), «енергоефективний порт» (здійснення

заходів з ресурсозбереження, відновлення та раціонального споживання ресурсів) та «зелений порт» (зменшення негативного впливу на навколишнє природне середовище).

**Висновки.** У даному дослідженні охарактеризовано сутність «розумних» портів, встановлено основні переваги та труднощі у процесі трансформації портів у розумні порти. Узагальнення існуючого досвіду формування розумних портів дозволяє створити перші кроки у розробці теоретичної бази для розвитку портів у даному напрямку. Встановлено основні етапи трансформації портів у розумні.

Перехід до розумних портів стане ключовою визначальною тенденцією у світовій індустрії вантажних перевезень та судноплавства найближчими роками. Очікується, що 2024 року ринок цифрових інтелектуальних портів досягне 5,3 млрд. доларів. Декілька портів, в основному в Азії, Європі та Північній Америці, знаходяться в авангарді розвитку інтелектуальних портів, використовуючи поєднання нових та передових технологій для підвищення продуктивності та ефективності. «Розумні» порти, що інтегрують цифровізацію і використовують нові технології, стануть ключовими гравцями у світовій торгівлі в міру того, як світ вступає в 4IR.

Використання технології 4IR дозволяє портам стати більш інтелектуальними, дозволяючи різним зацікавленим сторонам - операторам терміналів, вантажовласникам та судноплавним компаніям приймати оптимальні рішення, удосконалювати процеси та підвищувати ефективність портових операцій [8].

Морські порти України починають освоювати цифрові технології та технології автоматизації. Однак обмеження дорогої інфраструктури та високошвидкісного ширококутового зв'язку поки що стримують цей процес.

Україні необхідно заздалегідь розробити дорожню карту або генеральний план та забезпечити необхідний бюджет та ресурси для створення розумних портів на державному рівні. Перехід до «розумних» портів з метою впровадження інновацій за допомогою автоматизації та інтелектуальних систем портових операцій є особливо доцільним для України, яка прагне підвищити продуктивність та конкурентоспроможність на міжнародному рівні [23]. Визначення таких пріоритетів та робота щодо їх реалізації саме зараз дуже важлива, оскільки Україна, як і ЄС, проходить етап значних змін, але пріоритети довгострокових проектів мають сприяти розвитку морських портів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. What Is a Smart Port? Port Digitalization (2021). [Електронний ресурс]- Режим доступу: <https://sinay.ai/en/smart-port-101-what-is-a-smart-port>
2. Smart Ports are the Gates to the Maritime Industry's Digital Future URL: <https://www.hellenicshippingnews.com/smart-ports-are-the-gates-to-the-maritime-industrys-digital-future/>
3. Решетков Д.М., Іванова І.М. Світовий досвід використання цифрових технологій у морських портах. *Транспортні системи і технології: проблеми функціонування та розвитку портів*. Том 6: монографія / [авт. кол.: Кириллова О.В., Пітерська В.М., Магамадов О.Р., Решетков Д.М. та ін.] за ред. О.В. Кириллової. Одеса: КУПРІЄНКО СВ, 2021. 159 с.

4. Sjors Berns, Rob Dickson, Indra Vonck, and Jochem Dragt (2017) Smart Ports: Point of View. Deloitte: Deloitte Port Services. URL: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/nl/Documents/energy-resources/deloitte-nl-er-port-services-smart-ports.pdf>
5. M. Jović, N. Kavran, S. Aksentijević and E. Tijan. The Transition of Croatian Seaports into Smart Ports (2019) *42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, 2019, pp. 1386-1390, <https://doi.org/10.23919/MIPRO.2019.8757111>
6. Karaš A.: Smart Port as a Key to the Future Development of Modern Ports (2020) TransNav, *The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 14, No. 1, pp. 27-31 <https://doi.org/10.12716/1001.14.01.01>
7. Deloitte, Smart Ports Point of View By Deloitte Port Services, 2017. URL: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/nl/Documents/energy-resources/deloitte-nl-er-port-services-smart-ports.pdf>
8. Smart port white paper. URL: [https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/x-lab/2019/5g\\_smart\\_port\\_whitepaper\\_en.pdf?la=en](https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/x-lab/2019/5g_smart_port_whitepaper_en.pdf?la=en)
9. Research in Transportation Business & Management Volume 41, December 2021, 100633 Technological trajectories and scenarios in seaport digitalization. URL: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
10. United Nations ESCAP (2021). Smart Ports Development Policies in Asia and the Pacific. URL: [https://www.unescap.org/sites/default/d8files/event-documents/SmartPortDevelopment\\_Feb2021.pdf](https://www.unescap.org/sites/default/d8files/event-documents/SmartPortDevelopment_Feb2021.pdf)
11. Transformation to smarter ports with Digital Age Communications. URL: <https://www.al-enterprise.com/-/media/assets/internet/documents/dac-for-ports-solution-sheet-en.pdf>
12. Hirata E. The potential of using blockchain technology in shipping and logistics industry. *Journal of Logistics Shipping Economics*. 2019; 53:61-70.
13. Philipp, R. Digital readiness index assessment towards smart port development (2020) *In Sustainability Management Forum*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.
14. Heilig, L.; Lalla-Ruiz, E.; Voß, S. (2017) Digital transformation in maritime ports: Analysis and a game theoretic framework. *Netnomics Econ. Res. Electron. Netw*, 18, 227–254.
15. United Nations ESCAP.2021. Smart Ports Development Policies in Asia and the Pacific. URL: [https://www.unescap.org/sites/default/d8files/event-documents/SmartPortDevelopment\\_Feb2021.pdf](https://www.unescap.org/sites/default/d8files/event-documents/SmartPortDevelopment_Feb2021.pdf)
16. Douaioui, Kaoutar & Fri, Mouhsene & Mabrouki, Charif & Semma, Elalami. (2018). Smart port: Design and perspectives. 1-6. <https://doi.org/10.1109/GOL.2018.8378099>
17. PRIORITIES OF EUROPEAN PORTS FOR 2019 – 2024. URL: [www.espo.be](http://www.espo.be)

18. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Pavlova, N., Kravchenko, O., & Borovyk, S. (2022). *Integrated Ship Cybersecurity Management as a Part of Maritime Safety and Security System*. IJCSNS, 22(3), 135. <https://doi.org/10.22937/IJCSNS.2022.22.3.18>
19. 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, <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.116.14>
20. Melnyk, O., Bychkovsky, Yu., Shumylo, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., Voloshyn, A., Cheredarchuk, N. Study of the risk assessment quality dependence on the ships accidents analysis. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, Vol. XXV, 136-146 (2022) <https://doi.org/10.21279/1454-864X-22-II-015>
21. Port of Hamburg: smartPORT solutions for the 21st century. URL: <http://www.mpforum.org/uploads/headpic/2018-04-11/5acdac7eb0ad3.pdf>
22. Maritime and Port Authority of Singapore – Singapore’s Next Generation Tuas Port Project. URL: <https://sustainableworldports.org/project/maritime-and-port-authority-of-singapore-singapores-next-generation-port/>
23. Стратегія розвитку морських портів України на період до 2038 року. URL: [www.rada.gov.ua](http://www.rada.gov.ua)

#### REFERENCES

1. What Is a Smart Port? Port Digitalization (2021). Retrieved from: <https://sinay.ai/en/smart-port-101-what-is-a-smart-port>
2. Smart Ports are the Gates to the Maritime Industry’s Digital Future. Retrieved from: <https://www.hellenicshippingnews.com/smart-ports-are-the-gates-to-the-maritime-industrys-digital-future/>
3. Reshetkov D.M., Ivanova I.M. Global experience of using digital technologies in seaports. Transport systems and technologies: problems of operation and development of ports [Svitovyy dosvid vykorystannya tsyfrovyykh tekhnolohiy u mors'kykh portakh. Transportni systemy i tekhnolohiyi: problemy funktsionuvannya ta rozvytku portiv] Volume 6: monograph / [author. col.: Kirillova O.V., Peterska V.M., Magamadov O.R., Reshetkov D.M. etc.] edited by O. V. Kirillova. Odesa: KUPRIENKO ST, 2021. 159 c.
4. Sjors Berns, Rob Dickson, Indra Vonck, and Jochem Dragt (2017) Smart Ports: Point of View. Deloitte: Deloitte Port Services. Retrieved from: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/nl/Documents/energy-resources/deloitte-nl-er-port-services-smart-ports.pdf>
5. M. Jović, N. Kavran, S. Aksentijević and E. Tijan. The Transition of Croatian Seaports into Smart Ports (2019) *42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, 2019, pp. 1386-1390, <https://doi.org/10.23919/MIPRO.2019.8757111>

6. Karaś A.: Smart Port as a Key to the Future Development of Modern Ports (2020) *TransNav, The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 14, No. 1, pp. 27-31 <https://doi.org/10.12716/1001.14.01.01>
7. Deloitte, Smart Ports Point of View By Deloitte Port Services, 2017. Retrieved from: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/nl/Documents/energy-resources/deloitte-nl-er-port-services-smart-ports.pdf>
8. Smart port white paper. Retrieved from: [https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/x-lab/2019/5g\\_smart\\_port\\_whitepaper\\_en.pdf?la=en](https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/x-lab/2019/5g_smart_port_whitepaper_en.pdf?la=en)
9. Research in Transportation Business & Management Volume 41, December 2021, 100633 Technological trajectories and scenarios in seaport digitalization. Retrieved from: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
10. United Nations ESCAP (2021). Smart Ports Development Policies in Asia and the Pacific. Retrieved from: [https://www.unescap.org/sites/default/d8files/event-documents/SmartPortDevelopment\\_Feb2021.pdf](https://www.unescap.org/sites/default/d8files/event-documents/SmartPortDevelopment_Feb2021.pdf)
11. Transformation to smarter ports with Digital Age Communications. Retrieved from: <https://www.al-enterprise.com/-/media/assets/internet/documents/dac-for-ports-solution-sheet-en.pdf>
12. Hirata E. The potential of using blockchain technology in shipping and logistics industry. *Journal of Logistics Shipping Economics*. 2019; 53:61-70.
13. Philipp, R. Digital readiness index assessment towards smart port development (2020) *In Sustainability Management Forum*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.
14. Heilig, L.; Lalla-Ruiz, E.; Voß, S. (2017) Digital transformation in maritime ports: Analysis and a game theoretic framework. *Netnomics Econ. Res. Electron. Netw*, 18, 227–254.
15. United Nations ESCAP.2021. Smart Ports Development Policies in Asia and the Pacific. Retrieved from: [https://www.unescap.org/sites/default/d8files/event-documents/SmartPortDevelopment\\_Feb2021.pdf](https://www.unescap.org/sites/default/d8files/event-documents/SmartPortDevelopment_Feb2021.pdf)
16. Douaioui, Kaoutar & Fri, Mouhsene & Mabrouki, Charif & Semma, Elalami. (2018). Smart port: Design and perspectives. 1-6. Retrieved from: <https://doi.org/10.1109/GOL.2018.8378099>
17. PRIORITIES OF EUROPEAN PORTS FOR 2019 – 2024. Retrieved from: [www.espo.be](http://www.espo.be)
18. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Pavlova, N., Kravchenko, O., & Borovyk, S. (2022). *Integrated Ship Cybersecurity Management as a Part of Maritime Safety and Security System*. *IJCSNS*, 22(3), 135. Retrieved from: <https://doi.org/10.22937/IJCSNS.2022.22.3.18>
19. 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, Retrieved from <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.116.14>

20. Melnyk, O., Bychkovsky, Yu., Shumylo, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., Voloshyn, A., Cheredarchuk, N. Study of the risk assessment quality dependence on the ships accidents analysis. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, Vol. XXV, 136-146 (2022). Retrieved from: <https://doi.org/10.21279/1454-864X-22-I1-015>
21. Port of Hamburg: smartPORT solutions for the 21st century. Retrieved from: <http://www.mpforum.org/uploads/headpic/2018-04-11/5acdac7eb0ad3.pdf>
22. Maritime and Port Authority of Singapore – Singapore’s Next Generation Tuas Port Project. Retrieved from: <https://sustainableworldports.org/project/maritime-and-port-authority-of-singapore-singapores-next-generation-port/>
23. Strategy for the development of seaports of Ukraine for the period until 2038 [Stratehiya rozvytku mors'kykh portiv Ukrayiny na period do 2038 roku]. Retrieved from: [www.rada.gov.ua](http://www.rada.gov.ua)

**ВЗАЄМОДІЯ ВИДІВ ТРАНСПОРТУ:  
ОСОБЛИВОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ  
В ПУНКТАХ ПЕРЕРОБКИ ВАНТАЖІВ**

**В.Ю. Федоров<sup>1</sup>, К.Г. Ковцур<sup>2</sup>, Н.В. Птиця<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>аспірант кафедри транспортних систем і логістики,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-0940-6774

<sup>2</sup>к.т.н., доцент, доцент кафедри транспортних систем і логістики,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-0445-5438

<sup>3</sup>к.т.н., доцент, доцент кафедри транспортних систем і логістики,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-4559-7651

**Анотація**

**Вступ.** На сьогоднішній день колаборація вимог клієнтів і політики взаємодії елементів ланцюга постачань ускладнює процеси, що відбуваються всередині інтегрованого ланцюга. Сьогодні вже складно уявити ланцюг постачання споживчих товарів без дистриб'юторів, розподільчих центрів, оптових баз. Усі ці учасники процесу постачання виконують функції, пов'язані з переробкою вантажів. Наявність в ланцюгах постачання пунктів переробки (ПП) дозволяє зменшити витрати усіх учасників. За рахунок вибору транспортних засобів (ТЗ) раціональної вантажності в ланках ланцюгів постачань, що передують ПП та йдуть опісля, досягається підвищення техніко-експлуатаційних показників роботи транспорту, таких як рівень завантаження ТЗ, загальний пробіг тощо. Крім економічних факторів, що обґрунтовують доцільність наявності проміжних пунктів в ланцюзі постачань, слід відзначити і екологічну складову, що підводить до зеленої логістики. Отже дослідження і вивчення функціонування ПП заслуговує особливої уваги дослідників. **Мета.** Дане дослідження спрямоване на виявлення факторів, що впливають на час перебування ТЗ у ПП вантажів. В роботі пропонується формалізація процесів, що відбуваються всередині таких пунктів з урахуванням особливостей та пріоритетів при обслуговуванні вантажопотоків згідно з існуючими вимогами таких пунктів. **Результати.** За допомогою аналізу літературних джерел виявлені методи формалізації реальних процесів в обслуговуванні ТЗ у ПП вантажів. Проаналізовано існуючі критерії оцінки функціонування таких пунктів. Запропоновано методіку визначення часу очікування ТЗ обслуговування в ПП з урахуванням особливостей реальних процесів, що відбуваються. **Висновки.** Запропонована методика визначення часу перебування ТЗ у ПП вантажів. Аналіз діяльності ПП вантажів показав, що існує відносний пріоритет в обслуговуванні ТЗ. Отримані результати становлять інтерес як для перевізників в питаннях планування роботи транспорту, так і для ПП вантажів.

**Ключові слова:** пункт переробки, термінал, вантаж, час обслуговування, час очікування, пріоритет, автомобільний транспорт.

**INTERACTION OF TRANSPORT MODES:  
FEATURES OF SERVICING VEHICLES AT CARGO-HANDLING FACILITIES**

**V.Yu. Fedorov<sup>1</sup>, K.H. Kovtsur<sup>2</sup>, N.V. Ptytsia<sup>3</sup>,**

<sup>1</sup>Ph.D. Student of the Department of Transport Systems and Logistics,  
*Kharkiv National Automobile and Road University, Kharkiv, Ukraine,*  
ORCID ID: 0000-0002-0940-6774

<sup>2</sup>Ph.D. of Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department  
of Transport Systems and Logistics,  
*Kharkiv National Automobile and Road University, Kharkiv, Ukraine,*  
ORCID ID: 0000-0002-0445-5438

<sup>3</sup>Ph.D. of Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department  
of Transport Systems and Logistics,  
*Kharkiv National Automobile and Road University, Kharkiv, Ukraine,*  
ORCID ID: 0000-0002-4559-7651

**Summary**

**Introduction.** Today, the collaboration of customer requirements and the policy of interaction between elements of the supply chain complicates the processes occurring within the integrated chain. It is difficult to imagine today the supply chain of consumer goods without distributors, distribution centers, wholesale bases. All these supply chain participants perform functions related to the cargo handling process. The availability of cargo-handling facilities in the supply chain can reduce the costs of all participants. The resulting increase in transport performance, such as vehicle load levels, etc., is due to the selection of vehicles of a rational load capacity at the supply chain links upstream and downstream of the cargo-handling facilities. In addition to the economic factors justifying the existence of intermediate points in the supply chain, there is also an environmental component leading to green logistics. Therefore, the research and study of the functioning of cargo-handling facilities requires special attention of researchers. **Purpose.** This study aims to identify factors affecting the time vehicles spend at cargo-handling facilities. The paper proposes to formalize the processes taking place inside cargo-handling facilities, taking into account the peculiarities and priorities in servicing cargo flows in accordance with the existing requirements of such facilities. **Results.** By means of analysis of literature sources the methods of formalization of real processes in the maintenance of vehicles at the cargo-handling facilities are revealed. The existing criteria for assessing the functioning of such facilities are analyzed. A methodology for determining the waiting time of service vehicles at cargo-handling facilities is proposed, taking into account the peculiarities of real processes. **Conclusions.** The methodology for determining the time of stay of vehicles in cargo-handling facilities is proposed. Analysis of the activities of cargo-handling facilities showed that there is a relative priority in servicing vehicles. The obtained results are of interest both for carriers in matters of transport planning and for cargo-handling facilities.

**Key words:** cargo-handling facilities, terminal, cargo, service time, waiting time, priority, road transport.

**Вступ.** На сьогоднішній день в усьому світі спостерігається збільшення попиту на доставку вантажів: як в регіональному, міжміському, так і в міжнародному сполученні. В той же час стрімкий розвиток ринкових відносин в сегменті

ринку автомобільних перевезень вплинув на утворення нових автотранспортних підприємств, що призвело до утворення конкуренції між транспортними компаніями. Утворені тенденції призводять до необхідності оперативного та якісного виконання логістичних операцій на всіх ланках ланцюга постачань. Однак операції, що відбуваються в ПП вантажів, за часом і характером виконання досить часто носять стохастичний характер. ПП вантажів можуть бути як пункти навантаження (вантажовідправники), так і пункти розвантаження (вантажодержувачі). Часто в таких ПП вантажів може відбуватись і безпосередня перевалка вантажів з одного ТЗ на інший, а отже такі пункти стають проміжними пунктами в ланцюзі постачань. Такі термінали виконують більш ширші функції, аніж звичайні ПП, а отже і формалізація процесів, що відбуваються в середині такої складної системи стає надскладним питанням. Виходячи з цього можна стверджувати, що від якісної організації процесів, що відбуваються в ПП вантажів і буде залежати ефективність функціонування всього ланцюга постачань.

**Постановка проблеми.** На відміну від операцій транспортування, де процес оптимізується за допомогою відомих методів (вирішення задач маршрутизації, транспортної задачі тощо), операції в ПП вантажів залишаються практично неоптимізованими. Критерієм такої оптимізації має стати час обробки вантажів, зменшення якого призведе до оптимізації роботи ПП та зменшення непродуктивних простоїв ТЗ перевізників. Однак при вирішенні такої задачі, необхідно врахувати параметри роботи пунктів перевалки, особливості вантажопотоків, що надходять до ПП, характеристики рухомого складу та особливості відносин з перевізниками, що визначені в договорах на перевезення. Визначення цих параметрів і дослідження їх впливу на критерій ефективності дозволило б раціоналізувати процес переробки вантажів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогоднішній день опис процесів переробки вантажів в терміналах представлений в роботах багатьох дослідників. Спостерігається інтерес до вивчення процесів функціонування ПП вантажів саме водного транспорту [1-3]. Пояснюється така зацікавленість задовгими простоями ТЗ в очікуванні обслуговування, що призводить до зменшення рентабельності рухомого складу, збільшення витрат на доставку через штрафи за простої тощо.

В роботі [1] визначається перелік необхідних логістичних послуг для комплексного обслуговування в терміналах. Авторами запропоновано показники ефективності та повноти надання послуг в терміналах, що виражаються коефіцієнтами ефективності. Ранжування дозволило встановити, що сумісність та одночасне виконання декількох операцій (наприклад розвантаження і оформлення документів) є найважливішим фактором для клієнтів. Однак такі критерії, що відносяться до економічної групи (наприклад, витрати) за надані послуги виявились незначущими. Реалізація цього підходу може дозволити полегшити процес прийняття рішень. Але слід зазначити, що результати отримані на основі анкетування користувачів послуг конкретного терміналу, розташованого в Польщі, обмежує використання отриманих результатів на інших об'єктах.

Аналіз літературних джерел щодо оптимізації логістичних операцій в ланцюгу постачань показав, що основними напрямками розвитку транспортних послуг виступають такі процеси, які направлені на удосконалення та покращення

транспортної логістики в цілому: впровадження різноманітних автоматизацій, які базуються на штучному інтелекті, розвиток різнонаправлених систем блокчейну, введення комплексної політики діджиталізації, впровадження нових методів оцифрування інформації та використання хмарних технологій [4]. Але всі ці напрямки є додатковими і зможуть дати позитивний результат тільки після того, як сам технологічний процес переробки вантажів буде оптимізованим.

Однією з проблем раціоналізації надання транспортних послуг є неврегульована ситуація сумісної роботи ПП вантажів і вантажного транспорту. Оптимізація цього процесу дала б змогу збільшити продуктивність роботи як автомобільного транспорту, так і самих пунктів. Так в роботі [5] пропонується рішення проблеми обслуговування транспортних одиниць за допомогою багаточільової оптимізації. Значущими параметрами при цьому є час обробки ТЗ, його вантажність, тип і характеристики ПП. Запропонована модель перевірялась на реальному об'єкті дослідження. Критерієм ефективності запропоновано час доставки вантажів.

Особливої уваги заслуговують роботи, в яких процес обслуговування ТЗ описується за допомогою методів нечіткої логіки [6], нейтрософських методів [7], теорії масового обслуговування та теорії розкладів [8]. Ці моделі є більш реалістичними. Для опису довжини черги ТЗ в ПП вантажів зазвичай використовується Закон Літтла [9]. Так в роботі [10] на прикладі терміналу крос-докінгу пропонується вирішення питання визначення послідовності ТЗ на в'їзді і виїзді та план обслуговування, щоб звести до мінімуму час всього процесу. Використовується лагранжева релаксація, як метод, що перетворює складну задачу оптимізації з обмеженнями до наближеного більш простого виду.

Слід розуміти, що на практиці спостерігається наявність черг в ПП вантажів. Неналежне виконання графіків виконання операцій та надмірне очікування ТЗ призводить до додаткових витрат в явному або скритому вигляді. Саме тому спостерігається особливий інтерес дослідників у вивченні та формалізації процесів, що відбуваються в ПП вантажів.

**Формулювання цілей статті.** Основною метою даної роботи є визначення особливостей функціонування ПП, виявлення факторів, що обумовлюють поведінку в обслуговуванні вантажопотоків в ПП та формалізувати час очікування обслуговування ТЗ в таких пунктах.

**Виклад основного матеріалу.** В загальному випадку постановка задачі процесу переробки вантажопотоків полягає в тому, що протягом певного періоду часу кожне джерело доставки (вантажопотік) має свої характеристики – інтенсивність надходження, час обслуговування, вантажність ТЗ тощо, і кожен пункт призначення має певні вимоги та характеристики – переробна спроможність, кількість постів тощо. Критерієм ефективності має стати мінімізація сумарного часу, що витрачається як ТЗ, що перебувають в ПП, так і роботи самих пунктів. Раціоналізація даного критерію безпосередньо впливає на витрати усього ланцюга поставчань. Очевидно, що при незмінному обсязі матеріалопотоку, що прибуває до ПП наявна кількість механізмів буде здійснювати безпосередній вплив на сумарні витрати на простій ТЗ та механізмів.

В умовах практичної обмеженості переробної спроможності ПП і значної нерівномірності прибуття ТЗ на обслуговування неминуче виникнення черг ТЗ в очікуванні обслуговування. При цьому, ТЗ, що утворюють чергу, мають різні

техніко-економічні характеристики. Ця обставина наводить до того, що та чи інша послідовність обробки ТЗ суттєвим чином впливає на загальну вартість обробки. У таких умовах формалізація процесу обслуговування вантажопотоків в ПП зводиться до необхідності оптимізації черговості обробки ТЗ.

Але, оскільки технологія обробки транспортної одиниці в ПП не залежить від місця ТЗ в черзі, то і витрати на обслуговування не залежать і від порядку їх обслуговування. Тоді цільова функція даної задачі має зводитися до мінімізації втрат часу на очікування ТЗ початку обслуговування:

$$\sum_{i=1}^n W_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $W_i$  – час очікування обслуговування  $i$ -им ТЗ з черги.

Отже в результаті визначення раціональної черговості і досягається мінімізація сукупних витрат на обслуговування ТЗ в ПП вантажів.

Практика обслуговування ТЗ у пунктах переробки також вказує на існування певного пріоритету в обслуговуванні різних вантажопотоків. Під пріоритетом слід розуміти переважне право вибору з черги для обслуговування заявок, одного класу по відношенню до заявок інших класів. Отже ТЗ, що прибувають до ПП обслуговуються не в порядку їх хронологічного моменту прибуття [11].

В загальному випадку, якщо до обслуговування надходить заявка з певним пріоритетом, то ТЗ спочатку становиться останнім в чергу. Перед тим, як стати під обслуговування, має бути: завершено процес обслуговування того ТЗ, який вже знаходиться на посту і який вже почали обслуговувати; мають бути обслужені всі ТЗ, які вже знаходились в черзі, до приїзду останнього; а також обслужені всі ті ТЗ, які приїхали до пункту після досліджуваного за час його очікування, але які мали більший пріоритет і тому були обслужені раніше. Отже за час очікування обслуговування досліджуваного ТЗ існує ймовірність прибуття автомобілів з більш високим пріоритетом, що стануть під обслуговування раніше за ТЗ, що розглядається.

Введемо позначення для опису процесів в ПП вантажопотоків. Представимо ПП у вигляді системи масового обслуговування. Під вимогою в даному випадку вважаємо ТЗ, що прибув на обслуговування в ПП вантажів. Нехай:

$$k = 1, 2, \dots, r, \quad (2)$$

де  $k$  – номери пріоритетних класів вимог, що надходять в систему масового обслуговування.

Тоді функція розподілу ймовірностей тривалості обслуговування  $X_k$  вимог  $k$ -го пріоритету матиме вигляд:

$$G_k(t) = P(X_k \leq t), t > 0. \quad (3)$$

Нехай  $\lambda_k$  – інтенсивність надходження вимог  $k$ -го пріоритету, тоді навантаження на систему обслуговування вимог  $k$ -го пріоритету буде мати вигляд:

$$\rho_k = \lambda_k \cdot M(X_k) = \lambda_k \int_0^{\infty} t dG_k(t), \quad (4)$$

де  $M(X_k)$  – перший момент стаціонарного часу очікування вимог.

Нехай  $W_k$  – стаціонарний час очікування вимог  $k$ -го пріоритету, тоді для випадку, коли сумарне навантаження на систему обслуговування усіх пріоритетних класів буде меншим за одиницю, тобто:

$$\rho = \sum_{k=1}^r \rho_k < 1, \quad (5)$$

тоді отримаємо формулу для першого моменту стаціонарного часу очікування вимог  $k$ -го пріоритету:

$$M(W_k) = \frac{\sum_{j=1}^r \lambda_j^2 M(X_j^2)}{2 \left(1 - \sum_{j=1}^{k-1} \rho_j\right) \left(1 - \sum_{j=1}^k \rho_j\right)}. \quad (6)$$

У випадку, коли сумарне навантаження на систему обслуговування усіх пріоритетних класів буде більшою за одиницю, звісно, необхідно додати кількість каналів обслуговування в систему так, щоб навантаження на один канал стало меншим за одиницю.

**Висновки.** Головною особливістю функціонування ПП вантажів є робота з вантажопотоками, що надходять і є різними за своїми характеристиками та часом надходження. Така неоднорідність та стохастичність процесів призводить до неминучого виникнення черг автомобілів в очікуванні обслуговування, що призводить до зниження ефективності функціонування усього ланцюга постачань. Формалізація часу очікування ТЗ в черзі з урахуванням потреб ПП вантажів дає змогу спланувати роботу учасників даного процесу. В подальших дослідженнях необхідно провести апробацію запропонованої методики на реальному об'єкті для визначення типів існуючих пріоритетів потоків, здійснити збір та обробку статистичних даних про час обслуговування ТЗ для визначення часу перебування в таких пунктах.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Filina-Dawidowicz L, Kostrzewski M. The Complexity of Logistics Services at Transshipment Terminals. *Energies*. 2022; 15(4). 1435. <https://doi.org/10.3390/en15041435>.
2. Samrout M., Yassine A., Sbihi A. Optimization Model for Berth and Transshipment Scheduling. *15th International Doctoral Students Workshop on Logistics*, Magdeburg, 2022. pp. 72-82. <http://dx.doi.org/10.25673/85956>.
3. Tagawa H., Kawasaki T., Hanaoka S. Conditions influencing the choice between direct shipment and transshipment in maritime shipping network. *Journal of Shipping and Trade*. 6(4). 2021. <https://doi.org/10.1186/s41072-021-00085-3>.
4. Jović M, Tijan E, Brčić D, Pucihar A. Digitalization in Maritime Transport and Seaports: Bibliometric, Content and Thematic Analysis. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. 10(4): 486. <https://doi.org/10.3390/jmse10040486>.
5. Al-Sultan A., Alsaber A. Solving vehicle transshipment problem using multi-objective optimization. *Far East Journal of Applied Mathematics*, 114, 2022. pp. 65-82. <https://doi.org/10.17654/0972096022015>
6. Baskaran R., Dharmalingam K., Mohamed S., Mohamed Assarudeen S. Fuzzy transshipment problem with trans. *International Journal of Pure and*

- Applied Mathematics*. 107 (4). 2016. 1053-1062 <https://doi.org/10.12732/ijpam.v107i4.22>.
7. Kumar A., Chopra R., Saxena R. An Enumeration Technique for Transshipment Problem in Neutrosophic Environment. *Neutrosophic Sets and Systems*. 50, 2022. pp. 552-563. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6774926>.
  8. Voevodskii E. N., Postan M. Ya. Stochastic models of transport flow interaction at transshipment points. *Cybernetics and Systems Analysis*. 1993. 29.1. pp. 78-87.
  9. Kruse K. Waiting time in continuous review (s,s) inventory systems with constant lead times., *Operations Research*. 29.1981. pp. 202-207.
  10. Monaco M., Sammarra M. A multiplier adjustment algorithm for a truck scheduling and transshipment problem at a cross-docking terminal. *Soft Comput*. 2022, pp. 1-25. <https://doi.org/10.1007/s00500-022-06999-9>.
  11. Kovtsur K., Ptytsia N., Liubiy Y., Fedorov V. An approach to determine vehicle idle time at unloading points. *AIP Conference Proceedings* 2439. 2021. 020012-1–020012-11. <https://doi.org/10.1063/5.0068437>.

#### REFERENCES

1. Filina-Dawidowicz L & Kostrzewski M. (2022). The Complexity of Logistics Services at Transshipment Terminals. *Energies*, 15(4),1435. <https://doi.org/10.3390/en15041435>.
2. Samrout M., Yassine A. & Sbihi A. (2022). Optimization Model for Berth and Transshipment Scheduling. *15th International Doctoral Students Workshop on Logistics*, June 23, Magdeburg. <http://dx.doi.org/10.25673/85956>.
3. Tagawa H., Kawasaki T. & Hanaoka S. (2021). Conditions influencing the choice between direct shipment and transshipment in maritime shipping network. *Journal of Shipping and Trade*, 6, 4. <https://doi.org/10.1186/s41072-021-00085-3>
4. Jović M, Tijan E, Brčić D & Pucihar A. (2022). Digitalization in Maritime Transport and Seaports: Bibliometric, Content and Thematic Analysis. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(4), 486. <https://doi.org/10.3390/jmse10040486>.
5. Al-Sultan A. & Alsaber A. (2022) Solving vehicle transshipment problem using multi-objective optimization. *Far East Journal of Applied Mathematics*, 114, 65-82. <https://doi.org/10.17654/0972096022015>.
6. Baskaran R., Dharmalingam K., Mohamed S. & Mohamed Assarudeen S. (2016). Fuzzy transshipment problem with trans. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 107 (4), 1053-1062 <https://doi.org/10.12732/ijpam.v107i4.22>.
7. Kumar A., Chopra R. & Saxena R. An Enumeration Technique for Transshipment Problem in Neutrosophic Environment. *Neutrosophic Sets and Systems*, 50, 2022, 552-563. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6774926>.

8. Voevodskii, E. N., & Postan, M. Y. (1993). Stochastic models of transport flow interaction at transshipment points. *Cybernetics and Systems Analysis*, 29(1), 78-87.
9. Kruse K. (1981). Waiting time in continuous review (s,s) inventory systems with constant lead times, *Operations Research*, 29, 202–207.
10. Monaco M.F. & Sammarra M. (2022). A multiplier adjustment algorithm for a truck scheduling and transshipment problem at a cross-docking terminal. *Soft Comput*, 1-25. <https://doi.org/10.1007/s00500-022-06999-9>.
11. Kovtsur K., Ptytsia N., Liubiy Y. & Fedorov V. (2021). An approach to determine vehicle idle time at unloading points *AIP Conference Proceedings*, 2439, 020012-1–020012-11. <https://doi.org/10.1063/5.0068437>.

## АНАЛІЗ ЄВРОПЕЙСЬКОГО ДОСВІДУ ПРОЄКТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ КЛАСИФІКАЦІЙ МІСЬКИХ ВУЛИЦЬ І ДОРІГ

Г.Р. Фоменко

к.т.н., доцент кафедри проєктування доріг, геодезії і землеустрою,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,

Харків, Україна

ORCID ID: 0000-0001-8789-7575

### Анотація

**Вступ.** В статті розглянуті питання впливу рельєфу на умови формування функціональних зон забудови та вулично-дорожньої мережі на території міст. Безумовно, зміни стану рельєфу значно впливають на процес трасування міських вулиць і доріг при проєктуванні. Планування вулично-дорожньої мережі це одна із найважливіших із складових на території міст, яка пов'язана із рельєфом місцевості. Рельєф значно впливає на загальну композицію забудови. Особлива увага повинна приділятися влаштуванню поверхневих стоків. Покращення умов руху, удосконалення роботи вулично-дорожніх мереж можливе з урахуванням їх функціональних властивостей і класифікації. В нашій країні діє нормативний документ ДБН В.2.3-5-2018, в якому здійснюється розподіл на: магістральні дороги, магістральні вулиці загальноміського значення з безперервним та регульованим рухом, магістральні вулиці районного значення, місцеві промислово-складські дороги та вулиці. Приймаючи до уваги значну кількість дорожньо-транспортних пригод та конфліктних ситуацій із урахуванням закордонного досвіду, спрямованого на покращення безпеки та комфортності руху по території міст, розглянуті питання у мікрорегіоні України про внесення змін щодо класифікації міських вулиць і доріг за їх функціональним призначенням. Аналіз багаторічного закордонного досвіду, де використовуються функціональні класифікації вулиць і доріг свідчить про позитивні характеристики на протязі тривалого часу. **Метою статті** є аналіз закордонного досвіду з питань проєктування функціональної класифікації міських вулиць і доріг, спрямований на удосконалення вулично-дорожніх мереж у містах України.

Важливим є розгляд критеріїв функціональних класифікацій, які використовуються у Європейських країнах. **Результати.** Аналіз Європейських класифікацій та основних норм проєктування проводився «Комітетом по міським територіям» Світової дорожньої асоціації (PIARC), а також у рамках програм Європейської комісії виконувався спеціальний проєкт ARTISTS. Необхідно відмітити, що Європейські класифікації в порівнянні із північноамериканськими значно відрізняє більша різноманітність функціональних ознак у функціональних класифікаціях. Необхідно особливу увагу звернути на класифікації міських вулиць і доріг у Великобританії. Це полягає в тому, що англійська класифікація, а також нормування швидкості руху є майже традицією із високими показниками безпеки руху навіть по Європейським стандартам. Також відмінною рисою у класифікаціях Англії є їх раціональність.

Розробка цих документів та їх затвердження здійснюється у містах і графствах. У компетенції місцевого законодавства знаходяться вимоги по правилам забудови і акцентується увага для категорій вулиць, найбільш характерних та важливих у даному муніципалітеті. Існують класифікації Великого Лондона, округу Сіті, а також класифікації малих міст і графств. **Висновок.** В Британії значну увагу приділяють місцевій мережі і розробці класифікацій вулиць і доріг невеликих міст і населених пунктів. Англійський досвід розробки норм проектування місцевих вулиць може знайти відповідне використання в нашій країні.

**Ключові слова:** рельєф, вулично-дорожня мережа, функціональна класифікація, закордонний досвід.

### ANALYSIS OF EUROPEAN EXPERIENCE IN DESIGNING FUNCTIONAL CLASSIFICATIONS OF CITY STREETS AND ROADS

**H.R. Fomenko**

PhD, Associate Professor at the Department of Road Design,  
Geodesy and Land Management,  
Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine  
ORCID ID: 0000-0001-8789-7575

#### **Summary**

**Introduction.** The questions of the influence of the relief on the conditions for the formation of functional zones of development and the road network in the territories of cities are considered. Undoubtedly, changes in the state of the relief have a significant impact on the process of tracing city streets and roads during design. The planning of the road network is one of the most important components in the territory of cities, which is associated with the terrain. The relief significantly affects the overall composition of the building. Particular attention should be paid to the arrangement of surface drains. Improving traffic conditions, improving the operation of street and road networks is possible, taking into account their functional properties and classification. In our country, there is a regulatory document DBN V.2.3-5-2018, which divides into: main roads, main streets of citywide significance with continuous and controlled traffic, main streets of regional significance, local industrial and warehouse roads and streets. Taking into account a significant number of accidents and conflict situations, taking into account foreign experience aimed at improving the safety and comfort of movement on the territory of cities, the issues in the Ministry of Regional Development of Ukraine on introducing changes in the classification of city streets and roads according to their functional purpose were considered. An analysis of many years of foreign experience, where functional classifications of streets and roads are used, indicates positive characteristics for a long time. **The purpose of the article is** to analyze foreign experience in designing a functional classification of city streets and roads, aimed at improving street and road networks in Ukrainian cities.

It is important to consider the criteria for functional classifications used in European countries. **Results.** The analysis of European classifications and basic design standards was carried out by the Committee on Urban Areas of the World Road Association (PIARC), and a special project ARTISTS was carried out within the framework of the programs of the European Commission. It should be noted that European classifications,

*compared with North American ones, are significantly distinguished by a greater variety of functional characteristics in functional classifications. Particular attention should be paid to the classification of city streets and roads in the UK. This lies in the fact that the English classification, as well as the rationing of the speed of movement, is almost a tradition with high rates of traffic safety even by European standards. Also a distinctive feature in the classifications of England is their rationality. The development of these documents and their approval is carried out in cities and counties. The competence of local legislation is the requirements for building rules and focuses on the categories of streets that are most characteristic and important in a given municipality. There are classifications for Greater London, the City District, and also classifications for small towns and counties. **Conclusion.** In Britain, much attention is paid to the local network and the development of street and road classifications in small towns and settlements. The English experience in the development of local street design standards may find suitable use in our country.*

***Key words:** relief, road network, functional classification, foreign experience.*

**Постановка проблеми.** Особливості змін природного рельєфу обумовлюють розташування функціонального зонування міст на тій, чи іншій території. Безумовно, зміни стану рельєфу значно впливають на процес трасування міських вулиць і доріг при проектуванні. Планування вулично-дорожньої мережі це одна із найважливіших із складових на території міст, яка пов'язана із рельєфом місцевості. Рельєф значно впливає значно впливає на загальну композицію забудови. Особлива увага повинна приділятися влаштуванню поверхневих стоків. Як на вулично-дорожній мережі, так і районах забудови, вирішення цих питань здійснюється за допомогою вертикального планування з врахуванням усіх змін природного рельєфу, який має наступні особливості:

- рельєф із незначною складністю та розчленоватістю;
- рельєф із середньою складністю з наявністю середніх ухилів, горбистості та глибинної розчленоватості;
- до складного рельєфу слід віднести гірський.

В процесі планування території міст необхідно максимально зберегти природний рельєф і особливості ландшафту, відповідність новому будівництву, чи реконструкції районів.

Важливою складовою є вулично-дорожня мережа, яка повинна забезпечити, як комфортність так і безпеку руху при перевезенні пасажирів та вантажів. Значну увагу слід приділити функціональному призначенню і розвитку вулично-дорожньої мережі.

**Аналіз останніх досліджень.** Значне зростання рівня автомобілізації супроводжується зміною у складі транспортних потоків. Це сприяє суттєвому ускладненню умов та безпеці руху, утворенню конфліктних ситуацій. Покращення умов руху, удосконалення роботи вулично-дорожніх мереж можливе з урахуванням їх функціональних властивостей і класифікації. Значну увагу розвитку і удосконаленню вулично-дорожніх мереж у містах приділяється у роботах Івасенко В. В., Степанчука О. В., Ковальова В. В., Ландо Е. А., Безлюбченко О. С. та ін. [1-6]. Також розглядаються питання модернізації транспортно-дорожньої інфраструктури.

**Формулювання цілей статті.** Значна кількість дорожньо-транспортних і конфліктних ситуацій на міських вулицях потребує покращення умов та комфортності руху по території міст. Проектування функціональних класифікацій у країнах світу свідчить про позитивні результати. Метою статті є аналіз закордонного досвіду з питань проектування функціональної класифікації міських вулиць і доріг, спрямований на удосконалення вулично-дорожніх мереж у містах України.

**Виклад основного матеріалу.** Планування вулично-дорожньої мережі, геометричні схеми побудови, щільність, взаємозв'язок з рельєфом і ландшафтом у перспективному розвитку міст є важливим у благоустрої, безпеці для мешканців міст. Аналіз багаторічного закордонного досвіду, де використовуються функціональні класифікації вулиць і доріг свідчить про позитивні характеристики на протязі тривалого часу. В нашій країні діє нормативний документ ДБН В.2.3-5 [7], в якому здійснюється розподіл на: магістральні дороги, магістральні вулиці загальноміського значення з безперервним та регульованим рухом, магістральні вулиці районного значення, місцеві промислово-складські дороги та вулиці. Приймаючи до уваги значну кількість дорожньо-транспортних пригод та конфліктних ситуацій із урахуванням закордонного досвіду, спрямованого на покращення безпеки та комфортності руху по території міст, розглянуті питання у мінрегіоні України про внесення змін щодо класифікації міських вулиць і доріг за їх функціональним призначенням. Слід зауважити, що передбачається також розглянути на кого будуть розраховані зміни, а це: автомобілі, громадський транспорт та змішаний рух, пішоходи та маломобільні групи, велосипедисти, яким приділяється в теперішній час особлива увага [6].

Важливим є розгляд критеріїв функціональних класифікацій, які використовуються у Європейських країнах. Аналіз Європейських класифікацій та основних норм проектування проводився «Комітетом по міським територіям» Світової дорожньої асоціації (PIARC), а також у рамках програм Європейської комісії виконувався спеціальний проект ARTISTS [8, 9]. Необхідно відмітити, що координатором проекту ARTISTS був університет шведського міста Лунда. Окрім цього університету у роботі приймали участь сімнадцять організацій із восьми Європейських країн, а саме: Бельгії, Германії, Данії, Греції, Венгрії, Португалії, Іспанії та Великобританії. Метою проекту була розробка концепції «Стійких магістральних вулиць» (Sustainable Arterial Streets), в якій представлено докладний аналіз діючих Європейських норм. Необхідно відмітити, що Європейські класифікації в порівнянні із північноамериканськими значно відрізняє більша різноманітність функціональних ознак у функціональних класифікаціях [8].

Великий час був потрібен для роботи над класифікаціями, на основі якого із 39 критеріїв були визнані 14 основних, а також додаткові які визначили архітектурно-планувальні характеристики.

На основі аналізу класифікацій, які діють у країнах учасниках проекту, показав наступні основні результати:

- кількість критеріїв, які використовують для розподілу вулиць і доріг на категорії – 6;
- кількість критеріїв, які дозволяють виділити деякі категорії вулиць – 8.

Для доповнення класифікацій учасники проекту запропонували використувати окрім основних 14 критеріїв додаткові, які пов'язані із архітектурно-планувальними характеристиками: назва вулиці, поперечний профіль вулиці; форма забудови; озеленення; характер середовища вулиці; характер міського середовища; просторова структура; візуальна вісь; просторова інтеграція; морфологія міського середовища; структурна роль вулиці; роль вулиці, як комунікаційного коридора; роль вулиці на рівні міського району; використання прилеглих територій і фронту забудови; наявність центрів та ін.. Необхідно підкреслити, що класифікації які існують, головним чином базуються на основних транспортних критеріях та критеріях організації руху з використанням співвідношення функцій «Обслуговування руху – обслуговування доступу».

В цілому ідеї створення комфортних умов руху як транспорту, так і пішоходів, забезпечення пріоритетного проектування вулиць підтримуються багатьма професійними і громадськими організаціями [9]. Необхідно особливу увагу звернути на класифікації міських вулиць і доріг у Великобританії. Це полягає в тому, що англійська класифікація, а також нормування швидкості руху є майже традицією із високими показниками безпеки руху навіть по Європейським стандартам. Також відмінною рисою у класифікаціях Англії є їх раціональність. Розробка цих документів та їх затвердження здійснюється у містах і графствах. У компетенції місцевого законодавства знаходяться вимоги по правилам забудови і акцентується увага для категорій вулиць, найбільш характерних та важливих у даному муніципалітеті. Існують класифікації Великого Лондона, округу Сіті, а також класифікації малих міст і графств. Приклад класифікації міських вулиць і доріг Великого Лондона свідчить, що вона дуже проста і виділяє усього три класи зв'язків [10, 11]. Ця класифікація затверджена «Стратегічним керівництвом по плануванню Лондона» (Strategic Guidance for London Planning Authorities PPGIS). «Стратегічне керівництво» вказує, що привласнення категорій повинно бути засновано на функціях, які виконують дороги при обслуговуванні руху транспорту і забезпеченні доступу до прилеглих територій. Разом з тим використовуються і кількісні критерії. У класифікації, яка використовується у Лондоні, для зарахування вулиці до одного із класів зв'язків необхідно щоб вона мала визначений показник інтенсивності руху автобусів і вантажних автомобілів.

Стратегічні маршрути (Strategic Routs) – вони вміщують міські швидкісні дороги (motorways) на яких розміщені інформаційно-вказівні знаки із блакитним кольором. Найважливіші маршрути (Primary Routs) на яких інформаційно-вказівні знаки представлені зеленого кольору, до третіх віднесені пріоритетні – червоні маршрути (Red Routes). Необхідно відмітити, що стратегічні маршрути, які знаходяться у веденні Великого Лондона, мають ознаку аббревіатурою TLRN [10]. Особливість «червоних маршрутів» свідчить про їх особливий режим руху у будні дні з 7:00 до 19:00 години. У цей час забороняються зупинки та паркування, що підкреслюється суцільною червоною лінією розмітки нанесеної уздовж бордюрного каміння. За умов цілодобової заборони та зупинки або паркування приймається нанесення двійної червоної лінії. Згідно оцінкам, впровадження прийнятих червоних маршрутів у Лондоні дозволило на 6,4 % знизити кількість ДТП, на 20 % збільшити швидкість руху транспортних потоків і на 10 % – швидкість руху автобусних маршрутів.

Важливою умовою для призначення магістралі до стратегічних маршрутів є перевищення добової інтенсивності руху у двох із трьох вказаних показників:

- автобуси міського і міжміського сполучення – 300;
- автомобілі із невеликою вантажопідйомністю – 3000;
- автомобілі із середньою і великою вантажопідйомністю – 1000.

Розподільні дороги Лондона (London Distributor Roads) – ці дороги призначені для поїздок між округами і забезпечення зв'язків із графствами, і знаходяться в межах з територією Великого Лондона. Основною функцією цих доріг є забезпечення руху всередині міста, а також забезпечується доступ до прилеглих територій. Дороги цієї категорії складають переважачу частину «Мережі пріоритетного руху автобусів» (London Bus Priority Network). Умовою придатності магістралі до розподільних доріг Лондона є показники добової інтенсивності руху, які повинні перевищувати два із трьох:

- автобуси міського і міжміського сполучення – 100;
- автомобілі із невеликою вантажопідйомністю – 1000;
- автомобілі із середньою і великою вантажопідйомністю – 300.

Місцеві розподільні під'їзні дороги в округах (Local Distributor and Access Roads). Щоб віднести вулиці до розподільних доріг округів показники добової інтенсивності руху повинні перевищувати два із трьох:

- автобуси міського і міжміського сполучення – 30;
- автомобілі із невеликою вантажопідйомністю – 300;
- автомобілі із середньою і великою вантажопідйомністю – 1000.

Для покращення умов руху на місцевих вулицях (Access Roads) дозволяється заспокоєння руху, а пріоритет надається пішохідному руху [10].

В округах Великого Лондона, їх 32 і Сіті, налічується 1200 км віднесени до головних доріг (Principal Roads) і їх означає буква А на картах. В цілому на групу доріг А приходиться близько 30 % усього пробігу автомобільного транспорту в межах Великого Лондону. Сумарна протяжність розподільних доріг досягає 1600 км і позначаються вони буквами В або С. Більшість лондонських магістралей це еволюція старинних доріг, поглинених містом в ході його розвитку.

Лондон характеризується низьким показником ДТП, що обумовлено введеними умовами руху транспорту і обмеженими показниками швидкості руху (20-30 миль/год) [10].

Необхідно звернути увагу на класифікацію, що прийнята в окрузі Сіті, вона незначно відрізняється від «лондонської». Особливості класифікації в Сіті наведені в таблиці 1.

Слід відмітити, що майже 90 % поїздок у Сіті по трудовим цілям здійснюється на громадському транспорті. Стратегія розвитку передбачає збільшення пропускної здатності громадського транспорту, а саме подальший розвиток вулиць із пріоритетним рухом автобусів.

В Британії значну увагу приділяють місцевій мережі і розробці класифікацій вулиць і доріг невеликих міст і населених пунктів. Наприклад, розроблені і діють «Вказівки по проектуванню доріг» (Highway Design Guide) міста Йорк. «Вказівки по проектуванню Корнуолла» (Cornwall Design Guide) графства Корнуолл [11].

Основою для класифікацій і норм графств муніципалітетів, так званих «Місцевих посібників з проектування» (Local Design Guides) є документ «Дороги

і пішохідні шляхи житлових територій». Сучасна британська містобудівна і проєктна політика враховує досягнутий в невеликих містах і сільській місцевості рівень автомобілізації [10]. У зв'язку з цим особливу увагу приділяють безпеці руху, чим обумовлені показники розрахункової швидкості 20-30 миль/год (32-48 км/год).

Таблиця 1

**Функції вулиць Сіті**

Клас зв'язків (Tier)	Категорії доріг Сіті
Tier-1	Стратегічні дороги (Strategic Roads) повинні бути головним класом доріг, які використовують для руху усіх видів автомобільного транспорту, який в'їждє в Лондон і виїждє із нього, або переміщується в ньому на відстань 10 км і більше. Забезпечують зв'язок із національною дорожньою мережею. Транспортні функції є домінуючими.
Tier-2	Розподільні дороги Лондона (London Distributor Roads) повинні залучати і обслуговувати поїздки між округами і рух через територію округів. Транспортні функції є домінуючими, але при цьому повинно здійснюватися обслуговування користувачів прилеглих територій.
Tier-3	Розподільні дороги округів (Borough Distributor Roads) обслуговують поїздки в окрузі і з сусідніми округами. Повинні ефективно забезпечувати рух транспорту і подавати усі види обслуговування користувачам прилеглих територій.
Tier-4	Місцеві розподільні дороги (Local Distributor Roads) забезпечують місцеві поїздки в межах округу, починаючи і завершуючи в Сіті, виключенням є рух автобусів і велосипедистів, який може бути транзитним. Функції обслуговування місцевих користувачів території є домінуючими по відношенню до транспортних. Місцеві під'їдні дороги (Local Access Roads) обслуговують місцевих користувачів території і тільки пов'язаний з цим місцевий рух. В окремих випадках допускається влаштування місцевих автобусних маршрутів.

Англійський досвід розробки норм проєктування місцевих вулиць може знайти відповідне використання в нашій країні.

Таким чином для забезпечення комфортного переміщення по міським вулицям необхідно в процесі їх проєктування значну увагу слід приділяти особливостям рельєфу місцевості. Підготовка схеми вулично-дорожньої мережі невід'ємно пов'язана із її планувальною композицією. Слід приділити увагу зв'язку вулично-дорожньої мережі із формуванням функціональних зон у містах, які пов'язані із тими чи іншими змінами рельєфу. Важливим є досягнення гармонії рельєфу із особливостями забудови і ландшафтному проєктуванню з використанням елементів дизайну.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Безлюбченко О.С. Планування і благоустрій міст. Харків, ХНАМГ, Будівництво, 2011, 191 с.
2. Губіна М.В. Формування житлової забудови у містах. Київ, 1994. 136 с.
3. Степанчук О.В. Особливості функціонування вулично-дорожньої мережі міста. зб. Проблеми розвитку міського середовища. 2015. Вип. 2. С. 37-46.

4. Івасенко В.В. Удосконалення вулично-дорожніх мереж з урахуванням принципів універсального дизайну. Містобудування та територіальне планування. 2016. Вип. 59. С. 149-154.
5. Ландо Е.А. Автомобильные дороги и уровень автомобилизации. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2013. № 10. С. 36-40.
6. Ковальов В.В. Організація модернізації транспортно-дорожньої інфраструктури при комплексній реконструкції міської забудови. *Науковий вісник будівництва*. Харків: ХНУБА, 2018. Т. 92, № 2. С. 167-172.
7. ДБН В.2.3-5:2018. Вулиці та дороги населених пунктів. Мінрегіонбуд. Київ: 2018. 50 с.
8. PIARC: Urban road design and architecture, reference: 10.08.B, Routes/Roads special issue II-1995. P. 51-126.
9. PIARC: Priority for public transport and other high occupancy vehicles (HOV) on urban roads. Roads special issue II. 1995. P. 1-51.
10. City of London Unitary Development Plan 2002 Chapter 9: Transport and Movement 2002. P. 99-136.
11. City of Tshwane. Streetscape Design Guidelines. Housing, City planning and Environmental Management Department. Second Ed. August 2007. 75 p.

#### REFERENCES

1. Bezliubchenko O.S. (2011). Planning and development of cities. [Planuvannia i blahoustrii mist] KhNAMG, Construction. Kharkiv. [in Ukrainian].
2. Hubina M.V. (1994). Formation of residential buildings in cities. [Formuvannia zhytlovoi zabudovy u mistakh]. Kyiv. [in Ukrainian].
3. Stepanchuk O.V. (2015). Peculiarities of functioning of the street and road network of the city. [Osoblyvosti funktsionuvannia vulychno-dorozhnoi merezhi mista]. *zb. Problemy rozvytku miskoho seredovyshcha*, 37-46. [in Ukrainian].
4. Ivasenko V.V. (2016). Improvement of street and road networks taking into account the principles of universal design. [Udoskonalennia vulychno-dorozhnikh merezh z urakhuvanniam pryntsyypiv universalnoho dyzainu]. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, 149-154. [in Ukrainian].
5. Lando E.A. (2013). Highways and the level of motorization. [Avtomobylnye dorohy y uroven avtomobylyzatsyy]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, 36-40. [in Russian].
6. Kovalov V.V. (2018). Organization of the modernization of transport and road infrastructure during the complex reconstruction of urban buildings. [Orhanizatsiia modernizatsii transportno-dorozhnoi infrastruktury pry kompleksnii rekonstruktsii miskoi zabudovy]. *Naukovyi visnyk budivnytstva*, 167-172. [in Ukrainian].
7. DBN V.2.3-5:2018. (2018). Streets and roads of settlements. [Vulytsi ta dorohy naselenykh punktiv.] Minrehionbud. Kyiv. [in Ukrainian].
8. PIARC: Urban road design and architecture, reference: 10.08.B, Routes/Roads special issue II. (1995). 51-126.

9. PIARC: Priority for public transport and other high occupancy vehicles (HOV) on urban roads. Roads special issue II. (1995). 1-51.
10. City of London Unitary Development Plan 2002 Chapter 9: Transport and Movement. (2002). 99-136.
11. City of Tshwane. (2007). Streetscape Design Guidelines. Housing, City planning and Environmental Management Department. Second Ed.

**СТРАТЕГІЧНІ ОРІЄНТИРИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА РОЗВИТКУ  
ПОРТОВИХ ТЕРМІНАЛІВ ЯК СКЛАДОВОЇ ТРАНСПОРТНОЇ  
ІНФРАСТРУКТУРИ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ**

**О.В. Шкуренко<sup>1</sup>, В.А. Будник<sup>2</sup>, М.Є. Перепічко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>д.е.н., доцент, професор кафедри «Бізнес-логістика та транспортні технології»,  
Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-0460-4800

<sup>2</sup>к.е.н., професор, професор кафедри «Бізнес-логістика та транспортні технології»,  
Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-8936-0875

<sup>3</sup>старший викладач кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт»,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0001-5172-1498

**Анотація**

**Вступ.** Необхідною умовою випереджального розвитку мультимодальної логістичної моделі доставки вантажів, організації на сучасному технологічному рівні глобальних і місцевих товарно-транспортних потоків є сталий розвиток морських портів як складової транспортної інфраструктури, що з'єднують транспортно-дорожній комплекс України із світовою транспортно-логістичною системою.

**Мета.** Стаття спрямована на визначення чинників, що впливають на ефективність діяльності морських портів, формування пропозицій щодо удосконалення діяльності портів комплексів та окреслення стратегічних орієнтирів збалансованого розвитку, ефективного використання портів потужностей.

**Результати.** Проаналізовано вантажообіг за усіма видами транспорту, зроблено акцент саме на перевезенні вантажів морським транспортом, що дозволило систематизувати чинники, що впливають на обсяги переробки вантажів на портів терміналах. Досліджено техніко-технологічні аспекти підвищення ефективності надання послуг з переробки вантажів у розрізі функціонування контейнерних терміналів. Сформовано основні напрямки модернізації контейнерного терміналу компанії ТІС та визначено техніко-експлуатаційні параметри модернізації технологічної лінії контейнерного терміналу ТІС. Деталізовано стратегічні орієнтири щодо напрямку збалансованого розвитку та ефективного використання портів потужностей. **Висновки.** Розвиток контейнерних морських перевезень є ключовим чинником підвищення ефективності світової торгівлі, удосконалення управління ланцюгами поставок у світовому масштабі, але потребує значних інвестицій у формування відповідної логістичної інфраструктури. Практична реалізація економічних та техніко-технологічних рішень дозволить забезпечити загальну пропускну спроможність морських портів України; ефективну взаємодію транспорту з акцентом на мультимодальні перевезення; підвищення рівня ефективності використання перевантажувальних комплексів у морських портах України до 70%; функціонування морських портів на інноваційній основі відповідно до концепцій «смарт-порт», «енергоефективний порт» та «зелений порт».

**Ключові слова:** транспортна інфраструктура, портів термінал, мультимодальні перевезення вантажів, контейнерні морські перевезення, логістична інфраструктура, логістика, портів потужності.

**STRATEGIC GUIDELINES FOR THE FUNCTIONING AND DEVELOPMENT  
OF PORT TERMINALS AS A COMPONENT OF THE TRANSPORT  
INFRASTRUCTURE OF MULTIMODAL TRANSPORTATION**

**O.V. Shkurenko<sup>1</sup>, V.A. Budnyk<sup>2</sup>, M.E. Perepichko<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Sciences (Economics), Associate Professor, Professor at the Department  
“Business Logistics and Transport Technologies”,  
State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-0460-4800

<sup>2</sup>Candidate of Sciences (Economics), Professor, Professor at the Department  
“Business Logistics and Transport Technologies”,  
State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-8936-0875

<sup>3</sup>Senior Lecturer at the Department “Operation of Ports and Technology of Cargo Works”,  
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0001-5172-1498

**Summary**

**Introduction.** A necessary condition for the anticipatory development of the multimodal logistics model of cargo delivery, the organization at the modern technological level of global and local goods and transport flows is the sustainable development of sea ports as a component of the transport infrastructure connecting the transport and road complex of Ukraine with the world transport and logistics system.

**Purpose.** The article is aimed at determining the factors affecting the efficiency of sea port terminals, forming proposals for improving the operation of port complexes and outlining strategic guidelines for balanced development, effective use of port facilities.

**Results.** Cargo circulation by all types of transport was analyzed, emphasis was placed on the transportation of cargo by sea transport, which made it possible to systematize the factors affecting the volume of cargo processing at port terminals. The technical and technological aspects of improving the efficiency of the provision of cargo processing services in the context of the functioning of container terminals have been studied. The main directions of the modernization of the container terminal of the TIS company were formed and the technical and operational parameters of the modernization of the technological line of the TIS container terminal were determined. Strategic orientations regarding the direction of balanced development and effective use of port capacities are detailed. **Conclusions.** The development of container shipping is a key factor in increasing the efficiency of world trade, improving the management of supply chains on a global scale, but it requires significant investment in the formation of the appropriate logistics infrastructure. The practical implementation of economic and technical-technological solutions will ensure the overall capacity of seaports of Ukraine; effective interaction of transport with an emphasis on multimodal transportation; increasing the level of efficiency in the use of transshipment complexes in seaports of Ukraine up to 70%; operation of sea ports on an innovative basis in accordance with the concepts of "smart port", "energy-efficient port" and "green port".

**Key words:** transport infrastructure, port terminal, multimodal cargo transportation, container sea transportation, logistics infrastructure, logistics, port facilities.

**Вступ.** Сталий розвиток морських портів, що з'єднують транспортно-дорожній комплекс України із світовою транспортно-логістичною системою, є необхідною умовою випереджального розвитку мультимодальної логістичної моделі доставки вантажів, організації на сучасному технологічному рівні глобальних і місцевих товарно-транспортних потоків, розроблення, впровадження і вдосконалення організаційно-правових моделей державно-приватного партнерства, інвестиційних механізмів, транспортного сервісу, що ґрунтується на кращому світовому досвіді та відповідає морській доктрині України на період до 2035 року [1].

Україна як морська держава має сприятливе географічне розташування, посідає значне місце в системі міжнародних відносин внаслідок посилення глобалізації світової торгівлі, інтеграції в євроатлантичний економічний простір, сталих традицій розвитку мореплавства та портової діяльності нашої держави, досягнень у сфері морської освіти та науки. Так, Україна має найбільшу серед держав Азово-Чорноморського басейну довжину морського узбережжя (2759,2 кілометра) і понад 72 тис. км<sup>2</sup> виключної морської економічної зони. Україна володіє найпотужнішим портовим потенціалом серед усіх держав Чорного моря. На світовому ринку праці моряків Україна представлена висококваліфікованими кадрами та має високий рейтинг серед країн-постачальників старшого командного складу, що працює під іноземними прапорами.

**Постановка проблеми.** Важливим елементом інфраструктури морських вантажних перевезень, зокрема, мультимодальних, є портові комплекси (термінали), ефективне функціонування яких в умовах глобалізації товарних ринків та невідомого зростання обсягів перевезень вантажів між Азією та Європою є запорукою використання транзитного потенціалу України, формування мультимодальних транспортно-логістичних систем, розбудови мережі міжнародних мультимодальних маршрутів через українську територію, реалізації інноваційних технологічних рішень у сфері доставки вантажів з метою зниження логістичних витрат тощо.

Одними з важливіших чинників конкурентоспроможності морських портових терміналів є запровадження прогресивних технологій обробки вантажів та суден, оснащення інфраструктурних об'єктів сучасними засобами механізації, підвищення рівня сервісу послуг, що надаються.

Отже, розвиток та модернізація інфраструктури морських портових терміналів, нарощування портових потужностей є необхідною умовою посідання Україною провідного місця на ринку світових логістичних послуг.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Науковій проблематиці щодо дослідження інфраструктури вантажних перевезень присвятили свої наукові праці такі вчені, як: О.О. Немчук, А.А. Остапчук [2], Т.Г. Логутова, М.М. Полторацький [3], О.І. Платонов [4], Р.В. Вернигора, А.М. Окороков, П.С. Цупров [5] та ін.

Науковцями у праці [6] було досліджено особливості формування транспортно-логістичних центрів на засадах державно-приватного партнерства. У [7] проаналізовано розвиток логістичної інфраструктури в умовах Євроінтеграції. Проте недостатньо висвітленими залишаються окремі питання ефективного функціонування та розвитку морських портових комплексів як елементу інфраструктури мультимодальних вантажних перевезень.

**Формулювання цілей статті.** Ціль роботи полягає у визначенні чинників, що впливають на ефективність діяльності морських портових терміналів, формуванні

пропозицій щодо удосконалення діяльності портових комплексів та окресленні стратегічних орієнтирів збалансованого розвитку, ефективного використання портових потужностей.

**Виклад основного матеріалу.** Порт є однією із основних ланок усього транспортного ланцюга від виробника до кінцевого споживача. Відповідно до Закону України «Про морські порти України» морський портовий термінал являє собою територію, на якій розташований комплекс технічних засобів і споруд для виконання операцій, пов'язаних з перевезенням і переробкою вантажів, а також обробкою суден. До цих операцій відносяться: прийом-відправка, навантаження-вивантаження, завезення-вивезення, сортування і зберігання вантажів, а також обслуговування суден. Експлуатацію морських терміналів здійснюють портові оператори – суб'єкти господарювання, що проводять вантажно-розвантажувальні роботи, обслуговування та зберігання вантажів, обслуговування суден і пасажирів, а також інші, пов'язані з цим, види господарської діяльності [8].

Проаналізуємо загальний вантажообіг за усіма видами транспорту, динаміка якого представлена на рис. 1.

Загальний вантажообіг за усіма видами транспорту у 2017 році зріс майже на 9% у порівнянні з 2015 роком, але починаючи з 2017 року спостерігається зниження вантажообігу, зокрема у 2021 році він склав 289,6 млрд. ткм, що на 15,7% менше за 2017 рік, на 8,3% за 2015 рік та на 0,2% за 2020 рік.



Рис. 1. Загальний обсяг вантажообігу за всіма видами транспорту за 2015-2021 рр., млрд.ткм

Джерело: побудовано авторами за даними [https://ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu\\_u/tr.htm](https://ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/tr.htm). Дані наведено без урахування тимчасово окупованої території Автономної Республіки Крим, м. Севастополя та частини тимчасово окупованих територій у Донецькій та Луганській областях

Вантажообіг у розрізі окремих видів транспорту змінювався у 2021 році у порівнянні з 2020 роком таким чином: найбільше зростання на 11,4% зафіксовано у перевезеннях автомобільним транспортом, друге місце посідає авіаційний – на 9,5%, відповідно третє місце залізничний – 2,7%, четверте – водний – 2,5%, за трубопровідним транспортом спостерігається зменшення на 14,6%.

Проаналізуємо перевезення вантажів морським транспортом. На рис. 2 надано динаміку обсягів перевезення вантажів морським транспортом за видами сполучення за 2015-2021 рр.

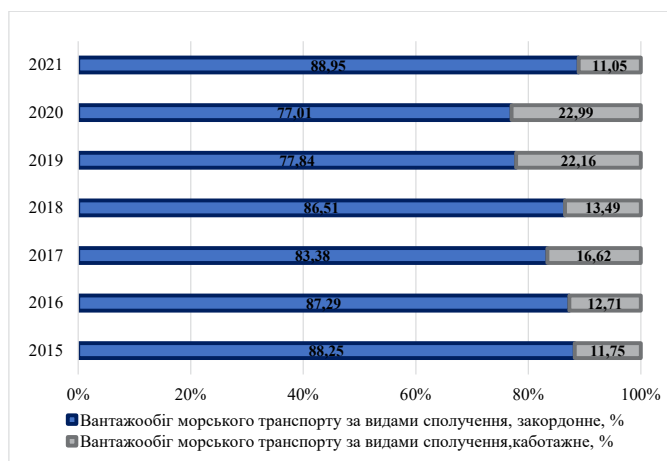


Рис. 2. Динаміка обсягів перевезення вантажів морським транспортом за видами сполучення за 2015-2021 рр.

Джерело: побудовано авторами за даними [https://ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu\\_u/tr.htm](https://ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/tr.htm). Дані наведено без урахування тимчасово окупованої території Автономної Республіки Крим, м. Севастополя та частини тимчасово окупованих територій у Донецькій та Луганській областях.

Аналіз перевезення вантажів морським транспортом у розрізі їх видів свідчить, що перше місце займають метали, на другому – хлібні. Відповідно до видів сполучення найбільшу питому вагу складають закордонні перевезення вантажів.

На рис. 3 відображено співвідношення обсягу перевезення вантажів морським транспортом та вантажообіг у динаміці за 2015-2021 рр.



Рис. 3. Динаміка обсягу перевезення вантажів морським транспортом та вантажообіг за 2015-2021 рр.

Джерело: побудовано авторами за даними [https://ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu\\_u/tr.htm](https://ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/tr.htm). Дані наведено без урахування тимчасово окупованої території Автономної Республіки Крим, м. Севастополя та частини тимчасово окупованих територій у Донецькій та Луганській областях.

Обсяг перевезення вантажів морським транспортом у 2021 році скоротився в 1,8 рази (з 3292 до 1852 тис.т) у порівнянні з 2015 роком. Одна з головних причин зменшення обсягів перевезення вантажів українськими судноплавними компаніями – незадовільний стан їх флоту, 66% якого має вік більше 30 років

Тому надалі досліджено техніко-технологічні аспекти підвищення ефективності надання послуг з переробки вантажів в частині функціонування контейнерних терміналів, враховуючи розповсюдження саме цих портових комплексів у портах України як ланок логістичного ланцюга поставок експортно-імпортової та внутрішньої продукції, що слідує саме через морські порти.

Портова система України налічує 18 морських портів, 13 з яких знаходяться на континентальній території України, і 5 портів – на тимчасово окупованій території АР Крим. Загальна потужність континентальних портів та терміналів становить 313,3 млн. т. [9].

Найбільшими морськими портами України є Південний, Одеса, Миколаїв та Чорноморськ, на які припадає близько 80% загальної потужності. Ключовими перевагами цих морських портів є наявність глибоководних підходів, що дозволяють обслуговувати великотоннажні морські судна [10].

Протягом 2013-2019 рр. обсяги перевалки в портах України залишаються відносно стабільними, основними рушіями є експортна та імпортна торгівля. Водночас спостерігається тенденція до зменшення транзитних обсягів. Це викликано повним припиненням транзиту з Російської Федерації. Обсяги каботажу залишаються незначними, але потенціал може бути збільшений після активізації річкових перевезень [10].

Контейнерний термінал ТІС – новітній контейнерний термінал України, модернізований для прийому та обробки найбільших суден, які тільки можуть увійти в Чорне море і які не може прийняти жоден інший порт в Україні; має найдовший і самий глибоководний (16 м) контейнерний причал в країні, а також здатний вивантажувати навалочні вантажі [11].

В умовах зростаючої конкуренції «ТІС-КТ» являє собою один з найбільш глибоководних, сучасних і швидкозростаючих контейнерних терміналів в країні. У 2017 році він обробив 124,9 тис TEU, в 2018 році – 172,4 тис. TEU, в 2019 – 220,7 тис. TEU, проте його проектна потужність – в 2 рази більше. Його вантажообіг за останні кілька років збільшилась як мінімум в 2,5 рази. За 9 років роботи, по жовтень 2020 року включно, контейнерообіг терміналу склав близько 900 тис. TEU [11].

Контейнерний термінал ТІС-КТ восени 2020 року змінив логотип та назву на «DP World TIS Pivdennyi». Оновлення фірмового стилю стало логічним продовженням інтеграції терміналу до сім'ї одного з найбільших портових операторів у світі DP World, який в червні 2020 року став співвласником ТІС-Контейнерний термінал. Тепер у компанії буде унікальна для Чорноморського регіону пропозиція: пряме сполучення між терміналами в Констанці, Яримдже та Південному з використанням власної фідерної мережі UniFeeder. В синергії з досвідом DP World з усунення вузьких місць в логістичних ланцюжках, це дасть можливість відправляти вантажі по ключових для Східної Європи торгових маршрутах, використовуючи активи DP World в Румунії та Туреччині [12].

Надалі сформовано основні напрямки модернізації контейнерного терміналу компанії ТІС та визначено техніко-експлуатаційні параметри модернізації технологічної лінії контейнерного терміналу ТІС задля досягнення обсягів перевалки в 650000 TEU на рік. Так, розраховано, що місткість площадок контейнерного терміналу має становити 50000 TEU; перевалка здійснюватиметься з використанням дев'яти причальних консольно-козлових кранів типу Super-Post-Panamax для перевантаження контейнерів з судна на сушу; для забезпечення потрібної місткості контейнерного терміналу слід увести в експлуатацію 15 контейнерних секторних майданчиків (штабелів); на кожному контейнерному майданчику повинен розміщуватися штабель з 3504 контейнерів (довжина штабеля – 73 контейнери, ширина – 8 контейнерів, число ярусів – 6); перевантажувальні роботи на спроектованому контейнерному терміналі здійснюватиме 20 підйомно-транспортних машин: порталних мостових пневмоколісних кранів RTG – 10 од., річстакерів – 10 од. Отже, реалізація запропонованих заходів дозволить компанії ТІС провести модернізацію технологічної лінії контейнерного терміналу для досягнення обсягів перевалки в 650000 умовних контейнерів на рік з метою розбудови мережі міжнародних мультимодальних маршрутів через територію України.

Одна з головних переваг контейнерного терміналу полягає у інтеграції із залізничною інфраструктурою і технологічність, що забезпечує високу швидкість обробки вантажів. До того ж компанія однією з перших запустила регулярні залізничні контейнерні перевезення по Україні прямо з терміналів ТІС і відправляє 15 регулярних контейнерних поїздів по п'яти напрямках – в Дніпро, Київ, Харків, Тернопіль та Чернігів.

Обсяги переробки вантажів на портових терміналах залежать від низки зовнішніх та внутрішніх чинників, що відображено на рис. 4.

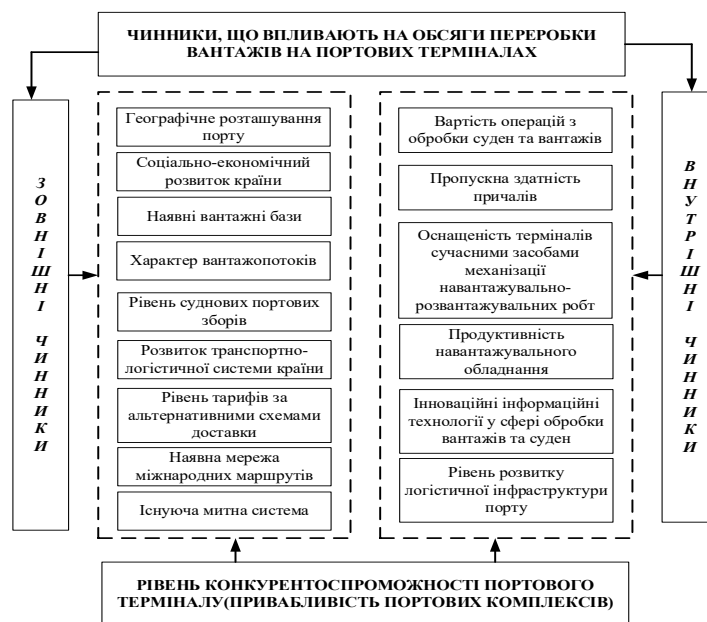


Рис. 4. Класифікація чинників, що впливають на обсяги переробки вантажів на портових терміналах

Джерело: складено авторами

Зазначені на рис. 4 чинники окрім класифікації на зовнішні та внутрішні, доречно об'єднати у демографічні, екологічні та технологічні, що регулюються державними та місцевими органами управління та впливають на діяльність портових терміналів.

Зокрема, внутрішні чинники перебувають у сфері впливу портової адміністрації та операторів, саме вони впливають на обсяги вантажопотоків, що залучаються в порт, та привабливість портових комплексів для перевізників та вантажовласників.

Україні як морській державі слід забезпечити конкурентну привабливість інфраструктури морегосподарського комплексу в цілому та портового господарства зокрема. Водночас, втрата за часи незалежності ролі провідної судноплавної країни пов'язана не лише із зменшенням флоту та відсутністю інвестицій у відродження суднобудування, а й з погіршенням конкурентоспроможності морських портів держави внаслідок недоцільної цінової політики, недостатнього фінансування розбудови інфраструктури морських портів, відсутністю цілеспрямованої політики щодо інноваційного реформування портового комплексу.

Компанією «Делойт» було проведено глобальне дослідження відносно тенденцій у портовій індустрії та представлено результати. Розвиток портової індустрії, зокрема розподіл вантажопотоків, конкурентні позиції учасників ланцюжку створення цінностей у порті залежить від низки демографічних, технологічних, екологічних чинників. З одного боку, на розвиток портової галузі в світі та України має вплинути *стратегія територіального розвитку* через синергію між портом та містом та створення кластерів. В цьому напрямку необхідно акцентувати увагу на пошуку цінностей порту для суспільства та бізнесу та переходу до системи управління портом за моделлю «порт-лендлорд». З іншої сторони, зростання нерівномірності та зміна балансу сил можуть спричинити переорієнтацію галузей, зміну торгівлі та як наслідок вплине на завантаження міжнародних та вітчизняних портів, а також призведе до зниження тарифів на основних контейнерних маршрутах. Також слід звернути увагу на розширення використання автоматизації та роботизації, що сприятиме формуванню більш сильних та ефективних кластерів, які будуть конкурувати між собою.

Надалі (рис. 5) деталізовано стратегічні орієнтири щодо напрямку збалансованого розвитку та ефективного використання портових потужностей, які можна охарактеризувати наявністю проблем, що потребують розв'язання, завдань та очікуваних результатів [13].

Як було зазначено на рис. 5, збалансований розвиток та ефективне використання портових потужностей залежить від комплексу організаційно-економічних та техніко-технологічних рішень. Зокрема, слід звернути увагу на такі напрями:

- гармонізація планів розвитку припортової інфраструктури (залізничних шляхів, припортових залізничних станцій, автомобільних доріг), внутрішніх водних шляхів та пропускної спроможності морських портів України з програмами розвитку транспортної інфраструктури загальнодержавного та місцевого рівня;
- вироблення дієвих механізмів інвестування у розвиток припортових залізничних станцій, під'їзних залізничних шляхів та електрифікації магістральних шляхів в напрямку морських портів України;
- перепрофілювання існуючих портових потужностей з перевалки вантажів, що не задіяні у виробничому процесі або використовуються у неефективний

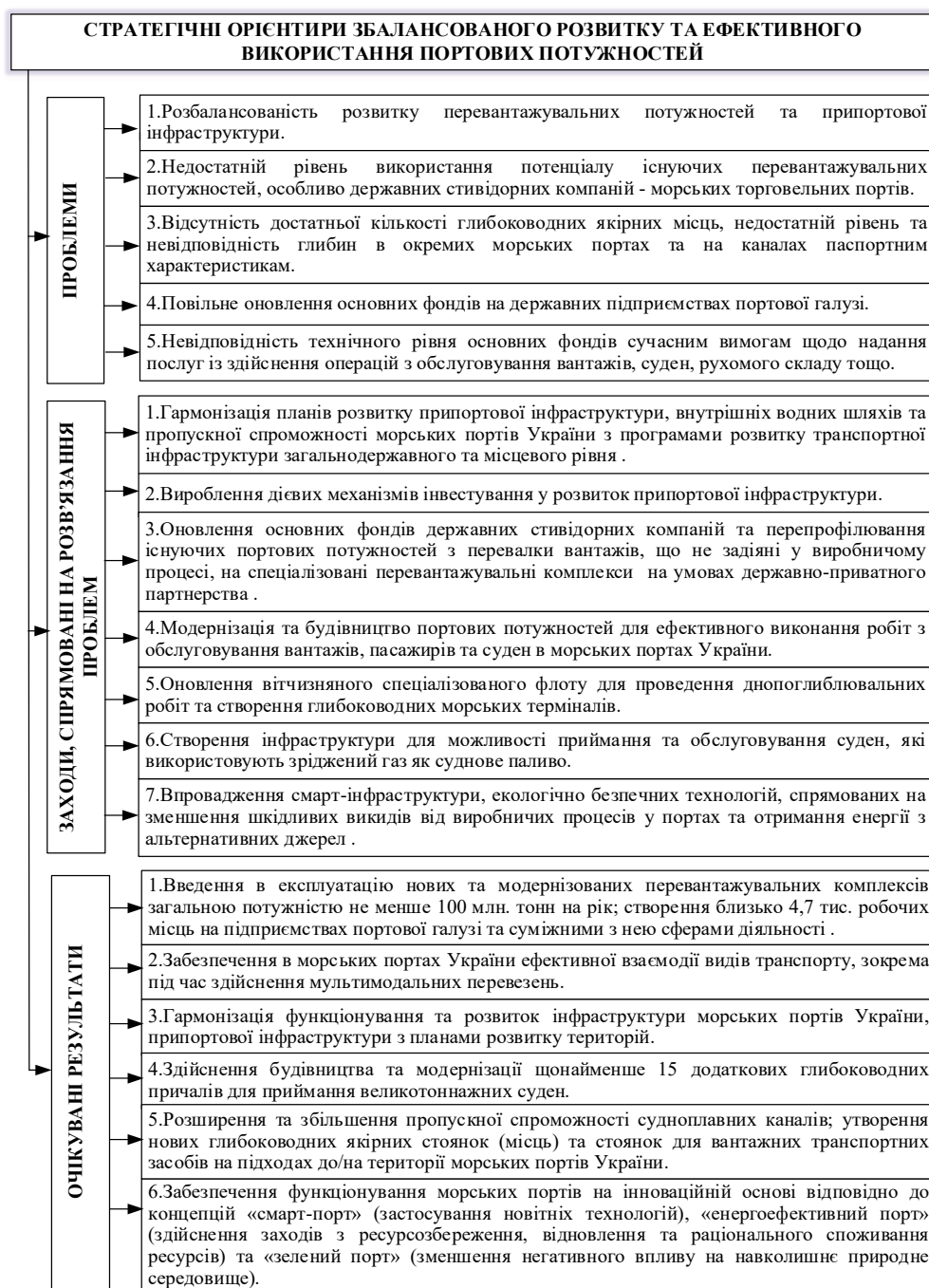


Рис. 5. Стратегічні орієнтири щодо напрямку збалансованого розвитку та ефективного використання портових потужностей  
Джерело: складено авторами на основі [13]

спосіб, на спеціалізовані перевантажувальні комплекси із залученням приватних інвестицій на умовах державно-приватного партнерства із створенням доданої вартості в морських портах України;

- модернізація та будівництво портових потужностей (особливо стратегічного значення) для ефективного виконання робіт з обслуговування вантажів, пасажирів та суден в морських портах України;
- оновлення вітчизняного спеціалізованого флоту для проведення днопоглиблювальних робіт; створення глибоководних морських терміналів;
- оновлення основних фондів державних стивідорних компаній за рахунок інвестиційних коштів, зокрема залучених на умовах державно-приватного партнерства;
- створення інфраструктури для можливості приймання та обслуговування суден, які використовують зріджений газ як суднове паливо;
- впровадження смарт-інфраструктури (новітніх технологій, що сприяють автоматизації та роботизації перевантажувальних процесів морських терміналів), екологічно безпечних технологій, спрямованих на зменшення шкідливих викидів від виробничих процесів у портах та отримання енергії з альтернативних джерел.

Практична реалізація вищенаведених заходів з окреслених напрямів дозволить забезпечити загальну пропускну спроможність морських портів України в обсязі близько 300 млн. тон через введення в експлуатацію нових та модернізованих перевантажувальних комплексів загальною потужністю не менше 100 млн. тон на рік; ефективну взаємодію транспорту з акцентом на мультимодальні перевезення; підвищення рівня ефективності використання перевантажувальних комплексів у морських портах України до 70%; функціонування морських портів на інноваційній основі відповідно до концепцій «смарт-порт», «енергоефективний порт» та «зелений порт».

**Висновки.** Розвиток контейнерних морських перевезень є ключовим чинником підвищення ефективності світової торгівлі, удосконалення управління ланцюгами поставок у світовому масштабі, але потребує значних інвестицій у формування відповідної логістичної інфраструктури. Контейнерні термінали відіграють важливу роль в розвитку транспортної галузі і економіки в цілому. Від рівня конкурентоспроможності контейнерних терміналів залежить місце України на світовому ринку транспортних послуг.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Морська доктрина України на період до 2035 року. Затверджено постановою Кабінету Міністрів України ід 7 жовтня 2009 р. № 1307 у редакції постанови Кабінету Міністрів України від 18 грудня 2018 р. № 1108. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1307-2009-%D0%BF#Text>.
2. Немчук О.О., Остапчук А.А. Розробка статистичного метода оцінки конкурентоспроможності портового терміналу. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля*. 2017. № 4 (234). С. 173-176.
3. Логутова Т. Г., Полторацький М. М. Аналіз діяльності українських морських портів: перспективи розвитку. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Економічні науки. 2017. Випуск 34. С. 68-75.
4. Платонов О.І. Трансформація до моделі управління «Порт-Лендлорд» як запорука розвитку мультимодальних перевезень. *Інвестиції*:

- практика та досвід*. 2020. № 13-14. С. 97-102. doi: 10.32702/2306-6814.2020.13-14.97.
5. Вернигора Р.В., Огороков А.М., Цупров П.С. Мультиmodalьні перевезення як базовий сегмент транзитного потенціалу України. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2017. Вип. 14. С. 20-29.
  6. Боняр С.М., Будник В.А., Карпенко О.О., Корнійко Я.Р. Формування мультиmodalьних транспортно-логістичних центрів на засадах державно-приватного партнерства. Київ. ТОВ «СІК ГРУП Україна». 2015. 152 с.
  7. Shkurenko O., Savchenko M. Strategy of Development of Logistic Infrastructure of Ukraine in the Conditions of European Integration. *SHS Web of Conferences* 67. 06046 (2019). pp. 3. doi: 10.1051/shsconf/20196706046.
  8. Закон України «Про морські порти України». URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/4709-17>.
  9. Інформація про водний транспорт України. Міністерство інфраструктури України. URL: <https://mtu.gov.ua/content/informaciya-pro-vodniy-transport-ukraini.html>.
  10. Національна стратегія збільшення прямих іноземних інвестицій в Україну. URL: <https://ukraineinvest.gov.ua/wp-content/uploads/2021/08/FDI-Strategy-Section-2-Transport-Infrastructure-UKR.pdf>.
  11. ТІС-контейнерний термінал. URL: <https://tripoli.land/ua/elevators/tis-konteynernyu-terminal>.
  12. Лиманська Агенція новин. URL: <https://lan.od.ua/main/4707-ts-kt-vdpravljatime-vantazh-koristujuchis-aktivami-dp-world-foto.html>.
  13. Стратегія розвитку морських портів України на період до 2038 року. Затв. розпорядженням Кабінету Міністрів України від 11 липня 2013 р. № 548-р (в редакції розпорядження Кабінету Міністрів України від 23 грудня 2020 р. № 1634-р). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/548-2013-%D1%80#n11>.

## REFERENCES

1. Maritime doctrine of Ukraine for the period until 2035 [Morska doktryna Ukrainy na period do 2035 roku]. Approved by Resolution No. 1307 of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated October 7, 2009, as amended by Resolution No. 1108 of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated December 18, 2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1307-2009-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].
2. Nemchuk, O.O. & Ostapchuk, A.A. (2017) Development of a statistical method for assessing the competitiveness of the port terminal [Rozrobka statystychnoho metoda otsinky konkurentospromozhnosti portovoho terminalu]. *Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl*. No. 4 (234). 173-176 [in Ukrainian].
3. Logutova, T. G. & Poltoratskyi, M. M. (2017) Analysis of the activity of Ukrainian seaports: prospects for development [Analiz diialnosti

- ukrainskykh morskyykh portiv: perspektyvy rozvytku]. Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Economic Sciences. Issue 34. 68-75. [in Ukrainian].
4. Platonov, O.I. (2020) Transformation to the "Port-Landlord" management model as a key to the development of multimodal transportation [Transformatsiia do modeli upravlinnia «Port-Lendlord» yak zaporuka rozvytku multymodalnykh perevezen]. Investments: practice and experience. No. 13-14. 97-102. doi: 10.32702/2306-6814.2020.13-14.97. [in Ukrainian].
  5. Vernyhora, R.V., Okorokov, A.M. & Tsuprov, P.S. (2017) Multimodal transportation as a basic segment of the transit potential of Ukraine [Multymodalni perevezennia yak bazovyi sehment tranzytnoho potentsialu Ukrainy]. Transport systems and transportation technologies. Issue 14. 20-29. [in Ukrainian].
  6. Bonyar, S.M., Budnyk, V.A., Karpenko, O.O. & Korniyko Y.R. (2015) Formation of multimodal transport and logistics centers on the basis of public-private partnership [Formuvannia multymodalnykh transportno-lohistychnykh tsentriv na zasadakh derzhavno-pryvatnoho partnerstva]. Kyiv. SIK GROUP Ukraine LLC. 152 p. [in Ukrainian].
  7. Shkurenko O., Savchenko M. Strategy of Development of Logistic Infrastructure of Ukraine in the Conditions of European Integration. SHS Web of Conferences 67. 06046 (2019). pp. 3. doi: 10.1051/shsconf/20196706046. [in ].
  8. Law of Ukraine "On Sea Ports of Ukraine" [Zakon Ukrainy «Pro morski porty Ukrainy»]. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/4709-17>. [in Ukrainian].
  9. Information about water transport of Ukraine [Informatsiia pro vodnyi transport Ukrainy]. Ministry of Infrastructure of Ukraine. URL: <https://mtu.gov.ua/content/informaciya-pro-vodniy-transport-ukraini.html>. [in Ukrainian].
  10. National strategy for increasing foreign direct investment in Ukraine [Natsionalna stratehiia zbilshennia priamykh inozemnykh investytsii v Ukrainu]. URL: <https://ukraineinvest.gov.ua/wp-content/uploads/2021/08/FDI-Strategy-Section-2-Transport-Infrastructure-UKR.pdf>. [in Ukrainian].
  11. TIS container terminal [TIS-konteynernyi terminal]. URL: <https://tripoli.land.ua/elevators/tis-konteyneryy-terminal>. [in Ukrainian].
  12. Lyman News Agency [Lymanska Ahentsiia novyn]. URL: <https://lan.od.ua/main/4707-ts-kt-vdpravljatime-vantazh-koristujuchis-aktivami-dp-world-foto.html>. [in Ukrainian].
  13. Strategy for the development of seaports of Ukraine for the period until 2038 [Stratehiia rozvytku morskyykh portiv Ukrainy na period do 2038 roku]. Approval by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated July 11, 2013 No. 548-r (as amended by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated December 23, 2020 No. 1634-r). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/548-2013-%D1%80#n11>. [in Ukrainian].

## **НОТАТКИ**

Наукове видання

## РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

Випуск 4(15), 2022

Засновник – Одеський національний морський університет

*Українською  
та англійською мовами*

Видається з жовтня 2016 р.

Формат 70×108/16. Гарнітура Times New Roman.  
Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 13,48.  
Замов. № 0223/084. Наклад 200 прим.

---

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»  
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1  
Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08  
E-mail: [mailbox@helvetica.ua](mailto:mailbox@helvetica.ua)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.

Scientific publication

# TRANSPORT DEVELOPMENT

**Scientific journal**

**Issue 4(15), 2022**

Founded by Odessa National Maritime University

*In Ukrainian and English*

Since October 2016

Format 70×108/16. Times New Roman Font.  
Offset. Digital printing. Conventional printed sheet 13,48.  
Order No 0223/084. Edition of 200 copies.

---

Publishing House “Helvetica”  
65101, Ukraine, Odessa, 6/1 Inglizi St.  
Phone: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08  
E-mail: [mailbox@helvetica.ua](mailto:mailbox@helvetica.ua)  
Certificate of publishing entity  
ДК № 7623 as of 22.06.2022