

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

ВИПУСК 3(14), 2022

Заснований у жовтні 2016 року



Видавничий дім
«Гельветика»
2022

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

№ 3(14)
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-Давідович 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 № 3 від 28 вересня 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 3(14), 2022

Founded in October 2016



Publishing House
"Helvetica"
2022

ODESSA
NATIONAL MARITIME UNIVERSITY
TRANSPORT DEVELOPMENT
SCIENTIFIC JOURNAL

№ 3(14)
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. *Kyryllova 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 3 dated September 28, 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

С.В. Мельников

Рівноваги у просторовій дуополії:
асиметрія ринків vs. продуктова диференціація.....9

**Л.В. Пізінцалі, О.М. Шумило, О.І. Россомаха, Н.І. Александровська,
О.А. Россомаха, Т.В. Рабоча**

Аналіз впливу традиційної геополітики
на ціну американського нафтового бареля.....25

МЕНЕДЖМЕНТ

I.A. Babayev, J.I. Babayev

Mechanisms of project management
of digital transformation of international multimodal transport.....39

Jeyhun Najafli, Cetin Elmas

Establishment of risk-oriented API/PNR programme model for effective
passenger control on international flights.....49

М.Ya. Postan, S.N. Dashkovskiy, I.M. Moskvichenko

Two-phase multi-nomenclature production/storage model with random input.....59

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

М.В. Босий

Теплові насоси для теплопостачання
та гарячого водопостачання підприємств машинобудування.....69

А.В. Рудик, В.М. Чуприна

Відповідність теоретичної моделі та результатів вимірів температури
і потужності процесу шліфування.....83

РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

М.Є. Рибальченко, Є.В. Білоусов

Використання числових профілів робочого процесу
для аналізу ефективності роботи суднового малообертового двигуна
на режимах часткових навантажень.....97

Yarovenko V.O., Chernikov P.S., Schumylo O.M., Zaritska O.I.

Mathematical model of transient modes of electric ships' propulsion complexes
with thrusters.....110

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

Н.М. Арцибашева, Т.М. Меленчук, О.В. Ковра Оцінка якості послуг в управлінні міським пасажирським транспортом.....	130
І.С. Афтаназів, Л.І. Шевчук, Р.З. Стоцько, І.Г. Свідрак, О.І. Строган, Л.Р. Струтинська Пошук безпілотними літальними апаратами плаваючих мін методами кінематичного проектування.....	143
V.V. Klymenko, N.I. Novalska, G.M. Lozova Influence of the Human Factor on Ensuring the Stability and Reliability of Transport and Logistics Systems during the Russian-Ukrainian War.....	166
О.М. Мельник, О.А. Онищенко, А.О. Волошин, Н.В. Васалатій, О.В. Логінов, К.С. Корякін Розвиток дистанційних технологій керування судном як фактор забезпечення безпеки судноплавства.....	179
Д.М. Решетков, Н.Л. Павлова Декарбонізація морських портів: проєкти та ініціативи.....	192

C O N T E N T S

ECONOMY

- S. V. Melnikov**
Equilibria in a spatial duopoly: market asymmetry
vs. product differentiation..... 9
- L.V. Pizintsali, O.M. Shumylo, O.I. Rossomakha, N.I. Aleksandrovskaya,
O.A. Rossomakha, T.V. Rabocha**
Analysis of the influence of traditional geopolitics
on the price of American oil barrel.....25

MANAGEMENT

- I.A. Babayev, J.I. Babayev**
Mechanisms of project management
of digital transformation of international multimodal transport.....39
- Jeyhun Najafli, Cetin Elmas**
Establishment of risk-oriented API/PNR programme model for effective
passenger control on international flights.....49
- M.Ya. Postan, S.N. Dashkovskiy, I.M. Moskvichenko**
Two-phase multi-nomenclature production/storage model with random input.....59

INDUSTRIAL MECHANICAL ENGINEERING

- M.V. Bosyi**
Heat pumps for heat supply and hot water supply
of maritime transport companies.....69
- A.V. Rudyk, V.M. Chupryna**
Correspondence of the theoretical model and the results of temperature
and power measurements of the grinding process..... 83

RIVER AND SEA TRANSPORT

- M.Y. Rybalchenko, I.V. Bilousov**
Usage of numerical profiles of the work process to analyze the efficiency
of the low-speed marine engine at partial loads..... 97
- Yarovenko V.O., Chernikov P.S., Schumylo O.M., Zaritska O.I.**
Mathematical model of transient modes of electric ships' propulsion complexes
with thrusters.....110

TRANSPORT TECHNOLOGIES (BY TYPE)

N.M. Artsybasheva, T.M. Melenchuk, O.V. Kovra Assessment of the quality of services in the management of city passenger transport.....	130
I.S.Aftanaziv, L.I. Shevchuk, R.Z. Stotsko, I.H. Svidrak, O.I. Strohan, L.R.Strutynska Search of floating mines by unmanned aerial vehicles using kinematic projection methods.....	143
V.V. Klymenko, N.I. Novalska, G.M. Lozova Influence of the Human Factor on Ensuring the Stability and Reliability of Transport and Logistics Systems during the Russian-Ukrainian War.....	166
O.M. Melnyk, O.A. Onyshchenko, A.O. Voloshyn, N.V. Vasalatii, O.V. Lohinov, K.S. Koriakin Development of remote technologies of ship control as a factor for ensuring shipping safety.....	179
D.M. Reshetkov, N.L. Pavlova Decarbonization of seaports: projects and initiatives.....	192

ЕКОНОМІКА

УДК 519.865:338.518

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.01>

РІВНОВАГИ У ПРОСТОРОВІЙ ДУОПОЛІЇ: АСИМЕТРІЯ РИНКІВ VS. ПРОДУКТОВА ДИФЕРЕНЦІАЦІЯ

С.В. Мельников

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

Анотація

Вступ. У теорії галузевих ринків для опису рівноважних станів використовуються, як правило, дві базові моделі – Курно та Бертрана. Після появи знаменитих робіт Курно і Бертрана, економісти ось уже більше ста років порівнюють між собою переваги кількісної (за Курно) та цінової (за Бертраном) конкуренції. У класичній моделі дуополії цінова конкуренція знижує ціни до рівня граничних витрат (парадокс Бертрана). Споживачі від цього виграють, а фірми отримують мінімальний прибуток. Тому, в рамках класичної моделі, фірми вважають за краще кількісну конкуренцію. Подолати парадокс Бертрана можливо за умови введення в модель інших характеристик реальних ринків, а саме: продуктової диференціації, динамічної взаємодії фірм, обмеження виробничих потужностей, просторового розташування фірм, тощо. **Метою** даної роботи є аналіз узагальненої моделі просторової дуополії [Liang, W.J., Hwang, H., & Mai, C.C., (2006). *Spatial discrimination: Bertrand vs. Cournot with asymmetric demands. Regional Science and Urban Economics*, 36, 790–802] в умовах асиметрії розмірів ринків та продуктової диференціації. З метою максимізації прибутку фірми спочатку вибирають місце розташування, а потім вид конкуренції – за Курно або Бертраном.

Результати. Показано, що при досить високому рівні асиметрії ринків, агломерація на більшому ринку є єдиною рівновагою Неша в чистих стратегіях, незалежно від виду конкуренції та характеру продуктової диференціації. Отримано, що стани рівноваги суттєво залежать від співвідношень між асиметрією ринків, продуктовою диференціацією та транспортним тарифом. Визначено відповідні залежності в аналітичному вигляді. На основі порівняльного аналізу рівноважних станів обґрунтовується оптимальна стратегія фірм щодо вибору місця розташування та виду конкуренції.

Висновки. Проведений у роботі аналіз дозволив сформулювати оптимальну стратегію фірм за критерієм прибутку. У ході конкурентної гри фірми обирають місце розташування та вид конкуренції. Місце розташування впливає на вибір виду конкуренції, та навпаки. Отримано, що незалежно від виду конкуренції, оптимальним для фірм є розташування на більшому ринку. А от

вибір оптимального виду конкуренції залежить від продуктової диференціації. При взаємодоповнюваності прибуток фірм буде вищим за цінової конкуренції. При взаємозамінності оптимальний вид конкуренції буде залежати від співвідношення між асиметрією ринків, продуктовою диференціацією та транспортним тарифом.

Ключові слова: просторова дуополія, асиметрія ринків, продуктова диференціація.

EQUILIBRIA IN A SPATIAL DUOPOLY: MARKET ASYMMETRY VS. PRODUCT DIFFERENTIATION

S. V. Melnikov

PhD, Associate Professor,

Associate Professor at the Department of Entrepreneurship & Tourism,

Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,

ORCID ID: 0000-0002-2627-9463

Summary

Introduction. *In the theory of industry markets, as a rule, two basic models are used to describe equilibrium states – Cournot and Bertrand. After the famous works of Cournot and Bertrand, economists have been comparing the advantages of quantitative (Cournot) and price (Bertrand) competition for more than a century. In the classical duopoly model, price competition drives prices down to the marginal cost level (Bertrand's paradox). Consumers will benefit from this, while firms receive minimal profits. Therefore, within the framework of the classical model, firms prefer quantitative competition. It is possible to overcome the Bertrand paradox if other characteristics of real markets are introduced into the model, namely: product differentiation, dynamic interaction of firms, limitation of production capacities, spatial location of firms, etc. **The purpose** of this paper is to analyze the generalized spatial duopoly model [Liang, W.J., Hwang, H., & Mai, C.C. (2006). Spatial discrimination: Bertrand vs. Cournot with asymmetric demands. *Regional Science and Urban Economics*, 36, 790–802] under conditions of asymmetric markets and product differentiation. In order to maximize profits, firms first select a location and then the type of competition – Cournot or Bertrand. **Results.** It is shown that with a sufficiently high level of markets asymmetry, agglomeration in a large market is the only Nash equilibrium in pure strategies, regardless of the type of competition and the nature of product differentiation. It was found that the equilibrium states significantly depend on the relationship between the markets asymmetry, product differentiation and transport tariff. The corresponding dependencies are determined in an analytical form. On the basis of a comparative analysis of equilibria, the optimal strategy of firms for choosing a location and type of competition is substantiated. **Conclusions.** The analysis carried out in the paper made it possible to formulate the optimal strategy of firms based on the criterion of profit. In the course of a competitive game, firms choose the location and type of competition. Location affects the choice of type of competition, and vice versa. It was found that regardless of the type of competition, it is optimal for firms to be located in a larger market. But the choice of the optimal type of competition depends on product differentiation. With complementarity,*

the profit of firms will be higher than in price competition. With substitutability, the optimal type of competition will depend on the relationship between market asymmetry, product differentiation and transport tariff.

Key words: *spatial duopoly, markets asymmetry, product differentiation.*

1. Введення та постановка проблеми

У класичній моделі дуополії цінова конкуренція (за Бертраном) призводить до зниження цін до рівня граничних витрат (парадокс Бертрана). Споживачі від цього вигають, а фірми одержують мінімальний прибуток. Тому, в рамках класичної моделі, фірми віддають перевагу кількісній конкуренції (за Курно).

Введення у модель інших характеристик реальних ринків дозволяє подолати парадокс Бертрана та розширити аналіз. Наприклад, в [1] показано, що при продуктивній диференціації рівноважні за Бертраном ціни перевищують граничні витрати. У цьому випадку фірми вибирають конкуренцію за Курно лише за взаємозамінності, а за взаємодоповнюваності їм вже вигідна конкуренція за Бертраном. При цьому для споживачів конкуренція за Бертраном вигідна незалежно від виду продуктової диференціації. У роботі [2] розширюється аналіз [1]. Поряд із взаємозамінністю продуктів також враховується асиметрія фірм за витратами та попитом. Доводиться, що під впливом асиметрії фірмам може бути вигідна конкуренція за Бертраном також і за взаємозамінності.

Ще одним напрямом є вивчення впливу виду конкуренції на процеси агломерації та дисперсії фірм у просторових моделях [3–7]. Отримано, що за цінової конкуренції фірми прагнуть до максимальної дисперсії задля подолання парадоксу Бертрана. За кількісної конкуренції розташування фірм істотно залежить від транспортних витрат. Низькі транспортні витрати стимулюють фірми агломеруватися та продавати на всіх ринках. За високих транспортних витрат фірмам вигідно монополізувати найближчий ринок та мінімізувати постачання на сусідні ринки.

Подальші дослідження пов'язані з урахуванням у просторових моделях продуктової диференціації та асиметрії розмірів ринків [8–10]. У [8] показано, що взаємозамінність (взаємодоповнюваність) продуктів посилює прагнення фірм до дисперсії (агломерації). Врахування асиметрії ринків у [9] призвело до зворотних від [1] результатів. Отримано, що, за досить високої асиметрії ринків, фірмам може бути вигідна цінова, а споживачам – кількісна конкуренція. У роботі [10] розвивається аналіз [9] для конкуренції Курно за довільної взаємозамінності продуктів.

Метою даної роботи є аналіз стратегічної взаємодії фірм на основі моделі [8–10] в умовах сумісного впливу асиметрії ринків і продуктової диференціації.

2. Модель

Два ринки розташовані на кінцях лінії одиничної довжини. Між ринками є асиметрія – обсяг ринку ліворуч (L) перевищує обсяг ринку праворуч (S). На лінії конкурують дві фірми з індексами i та j , $i, j = 1, 2, i \neq j$. На обох ринках фірми продають диференційовані продукти, арбітраж між споживачами виключено. Кожна фірма несе транспортні витрати t на постачання одиниці продукції на одиницю

відстані. Відстань i -ї фірми до L -ринку дорівнює x_i . Мета фірм – максимізація свого прибутку.

У роботах [8–10] дана модель аналізується при обмеженні на взаємне розташування фірм ($x_i \leq x_j$), як на рис. 1.

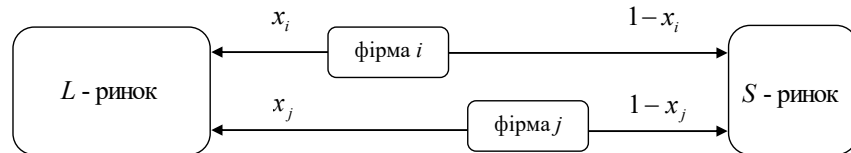


Рис. 1 Модель просторової дуополії

Джерело: [9]

У випадку симетрії ринків таке обмеження має сенс, оскільки полегшує аналіз і не порушує загальності результатів. Проте, за умов асиметрії ринків, близькість до більшого ринку дає конкурентну перевагу. Тому в нашій моделі відсутні обмеження на взаємне розташування фірм.

Для виведення функцій попиту скористаємося квадратичною функцією користності з [1]. Цільові функції споживачів на ринках:

$$\begin{aligned} U^L &= q_i^L + q_j^L - \frac{(q_i^L)^2 + 2\phi q_i^L q_j^L + (q_j^L)^2}{2\gamma} - p_i^L q_i^L - p_j^L q_j^L, \\ U^S &= q_i^S + q_j^S - \frac{(q_i^S)^2 + 2\phi q_i^S q_j^S + (q_j^S)^2}{2} - p_i^S q_i^S - p_j^S q_j^S, \end{aligned} \quad (1)$$

де p_i^L, p_i^S – ціни на продукт i -ї фірми на L і S ринках відповідно, q_i^L, q_i^S – обсяги пропозиції i -ї фірми, ϕ – коефіцієнт продуктової диференціації, $0 < |\phi| < 1$, $\gamma > 1$ – коефіцієнт асиметрії ринків.

Прийmemo, що фірми покривають обидва ринки, тобто $q_i^L > 0, q_i^S > 0$.
Прибуток i -ї фірми на обох ринках:

$$F_i = F_i^L + F_i^S = q_i^L (p_i^L - tx_i) + q_i^S (p_i^S - t(1 - x_i)).$$

Конкурентна гра складається з двох етапів. На першому етапі фірми одночасно обирають своє розташування. На другому етапі, враховуючи рішення про розташування, фірми одночасно вибирають свої обсяги пропозиції (ціни) при конкуренції за Курно (Бертраном). Рівновага моделі знаходиться за допомогою методу зворотної індукції.

3. Конкуренція Курно

З (1) виводимо функції попиту кожного ринку:

$$p_i^L = 1 - (q_i^L + \phi q_j^L) / \gamma, \quad p_i^S = 1 - q_i^S - \phi q_j^S. \quad (2)$$

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

$$q_i^L = \frac{\gamma - \phi q_j^L - \gamma t x_i}{2}, \quad q_i^S = \frac{1 - \phi q_j^S - t(1 - x_i)}{2}, \quad (3)$$

умови другого порядку: $\partial^2 F_i^L / \partial (q_i^L)^2 = -2/\gamma < 0$, $\partial^2 F_i^S / \partial (q_i^S)^2 = -2 < 0$.

Розв'язуючи системи рівнянь (3), знаходимо рівноважні обсяги пропозицій:

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

Умови покриття ринків:

$$\begin{aligned} q_i^L > 0 &\Leftrightarrow t < t_{\text{cov}}^L = \frac{2 - \phi}{2x_i - \phi x_j}, \\ q_i^S > 0 &\Leftrightarrow t < t_{\text{cov}}^S = \frac{2 - \phi}{2(1 - x_i) - \phi(1 - x_j)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Прибуток:

$$F_i = (q_i^L)^2 / \gamma + (q_i^S)^2. \quad (5)$$

На першому етапі фірми оптимізують своє розташування за даного розташування конкурента. З умови другого порядку (6) випливає, що функція прибутку (5) строго опукла вниз за місцем розташування:

$$\frac{\partial^2 F_i}{\partial x_i^2} = \frac{8t^2(\gamma + 1)}{(4 - \phi^2)^2} > 0. \quad (6)$$

Таким чином, в стані рівноваги Курно-Неша фірми розташуються тільки на ринках. Всього можливі чотири варіанти розташування фірм (x_i, x_j) : агломерація $(0, 0)$, $(1, 1)$, та дисперсія $(0, 1)$, $(1, 0)$. Знаючи можливі розташування, ми можемо завершити аналіз умов покриття ринків (4):

$$t_{\text{cov}}^C < \min \left\{ 1; \frac{2 - \phi}{2} \right\}.$$

Оптимальне розташування фірм залежить від виду продуктової диференціації, асиметрії ринків і транспортного тарифу. Вплив цих чинників на місце розташування впливає з функцій попиту (2). Наприклад, взаємозамінність продуктів відштовхує фірми, оскільки вони не зацікавлені у зростанні продажів конкурента, $\partial p_i / \partial q_j < 0$. Взаємодоповнюваність продуктів притягує фірми, оскільки вони зацікавлені у зростанні продажів конкурента, $\partial p_i / \partial q_j > 0$. Асиметрія ринків притягує фірми на ринок з більшим попитом (L-ринок).

На першому етапі конкурентну взаємодію фірм можна описати у вигляді біматричної гри (табл. 1).

Таблиця 1

Матриця гри на першому етапі

$i \backslash j$	L-ринок	S-ринок
L-ринок	$F_i(0, 0), F_j(0, 0)$	$F_i(0, 1), F_j(0, 1)$
S-ринок	$F_i(1, 0), F_j(1, 0)$	$F_i(1, 1), F_j(1, 1)$

Через симетричність фірм виконуються наступні співвідношення:

$$F_i(0, 0) = F_j(0, 0), F_i(1, 1) = F_j(1, 1), F_i(0, 1) = F_j(1, 0), F_i(1, 0) = F_j(0, 1).$$

Для пошуку рівноважних ситуацій порівняємо прибутки фірм за різних видів продуктової диференціації.

Порівняльний аналіз прибутків i -ї фірми при виборі розташування в умовах взаємозамінності представлений в табл. 2, де:

$$t_1 = \frac{2(2-\phi)(\gamma-1)}{\gamma(4-\phi)+\phi}, \quad t_2 = \frac{(2-\phi)(\gamma-1)}{\gamma+\phi-1}.$$

Таблиця 2

$F_i(0, 1) > F_i(0, 0) > F_i(1, 1) \geq F_i(1, 0)$	$0 < t \leq t_1$
$F_i(0, 1) > F_i(0, 0) \geq F_i(1, 0) > F_i(1, 1)$	$t_1 < t \leq t_2$
$F_i(0, 1) > F_i(1, 0) > F_i(0, 0) > F_i(1, 1)$	$t_2 < t < (2-\phi)/2$

Точка t_2 існує тільки у випадку невеликої асиметрії ринків, а саме при $\gamma < 1 + \phi$. При $\gamma \geq 1 + \phi$ точка t_2 зникає, тому що виходить за умову покриття: $t_2 \geq (2-\phi)/2$.

Проілюструємо аналіз із табл. 2 на рис. 2, де $\gamma = 3/2$, $\phi = 3/4$, $t_1 = 2/9$, $t_2 = 1/2$, $t_{cov}^C = 5/8$.

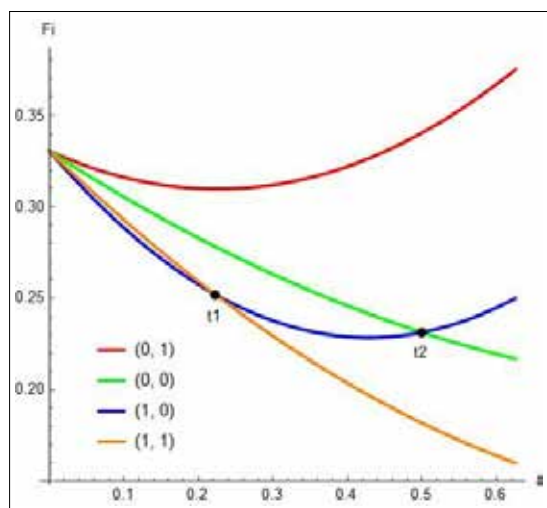


Рис. 2. Прибутки i -ї фірми у рівновазі Курно-Неша при взаємозамінних продуктах

Джерело: власна розробка

З рис. 2 випливає, що при взаємозамінності оптимальним для i -ї фірми є варіант, коли вона розташовується на L -ринку, а конкурент на S -ринку. Це очікуваний результат, зумовлений дією асиметрії ринків та взаємозамінністю продуктів. Збільшення транспортного тарифу посилює вигоди дисперсії, і при $t > t_2$ i -й фірмі навіть вигідніше окремо розташуватися на S -ринку, ніж агломеруватися на L -ринку.

Також на рис. 2 бачимо, що при стратегіях дисперсії зростання транспортного тарифу може призвести до збільшення прибутку i -ї фірми. Цей парадоксальний, на перший погляд, результат обумовлений тим, що збільшення тарифу призводить до монополізації ринків. Фірми збільшують прибуток за рахунок зниження обсягів транспортування на сусідній ринок та послаблення конкуренції.

Рівноваги у грі залежать від співвідношення між асиметрією ринків та взаємозамінністю продуктів.

При $\gamma \geq 1 + \phi$ вплив асиметрії домінує над впливом взаємозамінності, в результаті чого агломерація на L -ринку є єдиною рівновагою Неша в чистих стратегіях незалежно від транспортного тарифу. При $\gamma < 1 + \phi$ ситуація вже залежить від рівня транспортного тарифу. При $t \leq t_2$ агломерація на L -ринку є рівновагою Неша в чистих стратегіях, оскільки фірми виберуть L -ринок за будь-якого рішення конкурента. При $t > t_2$ у грі виникають дві рівноваги Неша в чистих стратегіях, в яких одна з фірм розташовується на L -ринку, а інша на S -ринку. При цьому рівноваги нерівноцінні і L -ринок має пріоритет.

Порівняльний аналіз прибутків i -ї фірми при виборі розташування в умовах *взаємодоповнюваності* представлений в табл. 3, де

$$t_3 = \frac{2(\gamma - 1)(2 + |\phi|)}{4\gamma + |\phi|(\gamma - 1)}, \quad t_4 = \frac{(\gamma - 1)(2 + |\phi|)}{\gamma + \gamma|\phi| - 1}.$$

Таблиця 3

$F_i(0, 0) > F_i(0, 1) > F_i(1, 0) \geq F_i(1, 1)$	$0 < t \leq t_3$
$F_i(0, 0) > F_i(0, 1) \geq F_i(1, 1) > F_i(1, 0)$	$t_3 < t \leq t_4$
$F_i(0, 0) > F_i(1, 1) > F_i(0, 1) > F_i(1, 0)$	$t_4 < t < 1$

Точка t_4 існує тільки при $\gamma < 1 + |\phi|$. При $\gamma \geq 1 + |\phi|$ точка t_4 зникає, тому що виходить за умову покриття: $t_4 \geq 1$.

Проілюструємо аналіз із табл. 3 на рис. 3, де $\gamma = 3/2$, $\phi = -3/4$, $t_3 = 22/51$, $t_4 = 11/13$, $t_{cov}^C = 1$.

З рис. 3 випливає, що при взаємодоповнюваності оптимальним варіантом для i -ї фірми є агломерація на L -ринку. Бачимо, що зростання транспортного тарифу посилює вигоди агломерації і при $t > t_4$ i -й фірмі навіть вигідніше агломеруватися на S -ринку, ніж розташуватися окремо на L -ринку.

Рівноваги у грі залежать від співвідношення між асиметрією ринків та взаємодоповнюваністю продуктів.

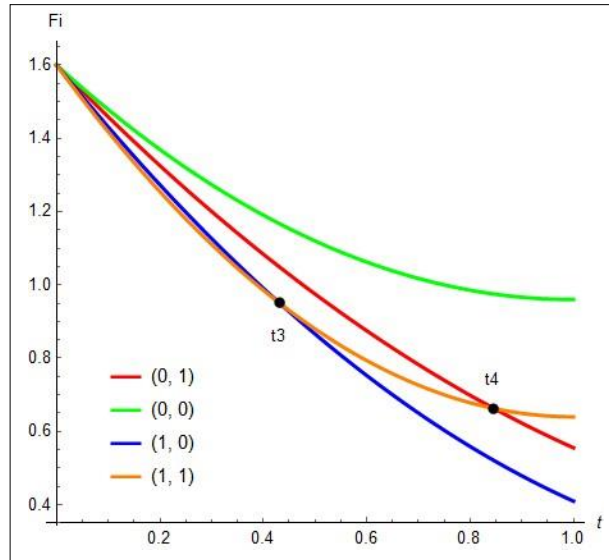


Рис. 3. Прибутки i -ї фірми у рівновазі Курно-Неша при взаємодоповнюваних продуктах

Джерело: власна розробка

При $\gamma \geq 1 + |\phi|$ агломерація на L -ринку є єдиною рівновагою Неша в чистих стратегіях незалежно від транспортного тарифу. При $\gamma < 1 + |\phi|$ ситуація вже залежить від рівня транспортного тарифу. При $t \leq t_4$ агломерація на L -ринку є рівновагою Неша в чистих стратегіях, оскільки фірми виберуть L -ринок за будь-якого рішення конкурента. При $t > t_4$ у грі виникають дві рівноваги Неша в чистих стратегіях, в яких фірми агломеруються. При цьому агломерація на L -ринку краща для обох фірм і є оптимальною за Парето.

4. Конкуренція Бертрана

З (1) виводимо функції попиту кожного ринку:

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

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

$$p_i^L = \frac{1-\phi + \phi p_j^L + t x_i}{2}, \quad p_i^S = \frac{1-\phi + \phi p_j^S + t(1-x_i)}{2}, \quad (7)$$

умови другого порядку:

$$\frac{\partial^2 F_i^L}{\partial (p_i^L)^2} = -\frac{2\gamma}{1-\phi^2} < 0, \quad \frac{\partial^2 F_i^S}{\partial (p_i^S)^2} = -\frac{2}{1-\phi^2} < 0.$$

Розв'язуючи системи рівнянь (7), знаходимо рівноважні ціни:

$$p_i^L = \frac{2-\phi-\phi^2 + 2t x_i + \phi t x_j}{4-\phi^2}, \quad p_i^S = \frac{2-\phi-\phi^2 + 2t(1-x_i) + \phi t(1-x_j)}{4-\phi^2}. \quad (8)$$

Ціни (8) збіглися з цінами у [8] і, таким чином, є інваріантними щодо асиметрії ринків.

Обсяги пропозицій:

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

Умови покриття ринків:

$$q_i^L > 0 \Leftrightarrow t < t_{\text{cov}}^B = \frac{2-\phi-\phi^2}{(2-\phi^2)x_i - \phi x_j}, \quad (9)$$

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

Прибуток:

$$F_i = (1-\phi^2) \left((q_i^L)^2 / \gamma + (q_i^S)^2 \right). \quad (10)$$

На першому етапі фірми оптимізують своє розташування за даного розташування конкурента. З умови другого порядку (11) випливає, що функція прибутку (10) строго опукла вниз за місцем розташування:

$$\frac{\partial^2 F_i}{\partial x_i^2} = \frac{2t^2(2-\phi^2)^2(\gamma+1)}{(1-\phi^2)(4-\phi^2)^2} > 0. \quad (11)$$

Таким чином, у стані рівноваги Бертрана-Неша фірми також розташовуватимуться лише на ринках. З (9) отримуємо умову покриття ринків:

$$t_{\text{cov}}^B < \min \left\{ 1; \frac{2-\phi-\phi^2}{2-\phi^2} \right\}.$$

На першому етапі конкурентну взаємодію фірм можна описати у вигляді біматричної гри (табл. 1). Порівняльний аналіз прибутків i -ї фірми при виборі розташування в умовах *взаємозамінності* представлений в табл. 4, де:

$$t_5 = \frac{2(\gamma-1)(2-\phi-\phi^2)}{\gamma(4-\phi-2\phi^2)+\phi}, \quad t_6 = \frac{2(\gamma-1)(2-\phi-\phi^2)}{(\gamma-1)(2-\phi^2)+2\phi}.$$

Таблиця 4

$F_i(0,1) > F_i(0,0) > F_i(1,1) \geq F_i(1,0)$	$0 < t \leq t_5$
$F_i(0,1) > F_i(0,0) \geq F_i(1,0) > F_i(1,1)$	$t_5 < t \leq t_6$
$F_i(0,1) > F_i(1,0) > F_i(0,0) > F_i(1,1)$	$t_6 < t < (2-\phi-\phi^2)/(2-\phi^2)$

Точка t_6 існує тільки у випадку невеликої асиметрії ринків, а саме при $\gamma < \frac{2+2\phi-\phi^2}{2-\phi^2}$. При $\gamma \geq \frac{2+2\phi-\phi^2}{2-\phi^2}$ точка t_6 зникає, тому що виходить за умову покриття: $t_6 \geq \frac{2-\phi-\phi^2}{2-\phi^2}$.

Проілюструємо аналіз із табл. 4 на рис. 4, де $\gamma=3/2$, $\phi=3/4$, $t_5=11/63$, $t_6=22/71$, $t_{cov}^B=11/23$.

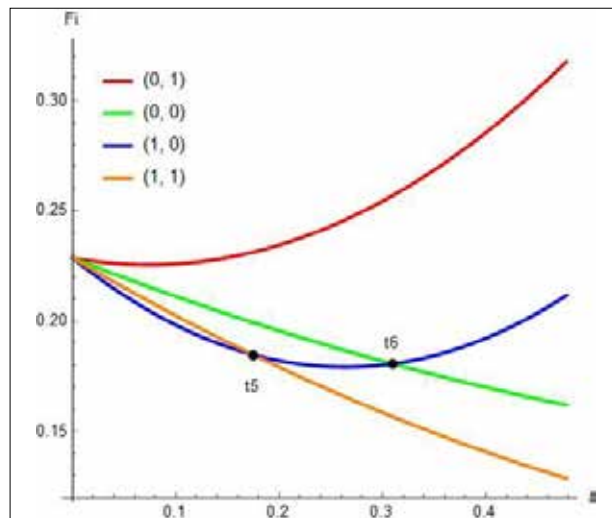


Рис. 4. Прибутки i -ї фірми у рівновазі Бертрана-Неша при взаємозамінних продуктах

Джерело: власна розробка

З рис. 4 випливає, що при взаємозамінності оптимальним для i -ї фірми є варіант, коли вона розташовується на L -ринку, а конкурент на S -ринку. Збільшення транспортного тарифу посилює вигоди дисперсії, і при $t > t_6$ i -ї фірмі навіть вигідніше окремо розташуватися на S -ринку, ніж агломеруватися на L -ринку.

Також на рис.4 бачимо, що при стратегіях дисперсії зростання транспортного тарифу може призвести до збільшення прибутку i -ї фірми. Це пов'язано з монополізацією фірмою прилеглого ринку.

Рівноваги у грі залежать від співвідношення між асиметрією ринків та взаємозамінністю продуктів.

При $\gamma \geq \frac{2+2\phi-\phi^2}{2-\phi^2}$ агломерація на L -ринку є єдиною рівновагою Неша в чистих стратегіях незалежно від транспортного тарифу. При $\gamma < \frac{2+2\phi-\phi^2}{2-\phi^2}$ ситуація

вже залежить від рівня транспортного тарифу. При $t \leq t_6$ агломерація на L -ринку є рівновагою Неша в чистих стратегіях, оскільки фірми виберуть L -ринок за будь-якого рішення конкурента. При $t > t_6$ у грі виникають дві рівноваги Неша в чистих стратегіях, в яких одна з фірм розташовується на L -ринку, а інша на S -ринку. При цьому рівноваги нерівноцінні і L -ринок має пріоритет.

У [9] доводиться, що при конкуренції за Бертраном фірми максимально диференціюються і монополізують ринки, незалежно від асиметрії ринків. Проте, в [9] аналізується лише випадок повної взаємозамінності продуктів, тобто при $\phi = 1$. Ми отримали, що в загальному випадку, $0 < \phi < 1$, конкуренція збережеться і рівноважне розташування фірм вже буде залежати від асиметрії ринків.

Порівняльний аналіз прибутків i -ї фірми при виборі розташування в умовах взаємодоповнюваності представлений в табл. 5, де

$$t_7 = \frac{2(\gamma-1)(2+|\phi|-\phi^2)}{\gamma(4+|\phi|-2\phi^2)-|\phi|}, \quad t_8 = \frac{2(\gamma-1)(2+|\phi|-\phi^2)}{(\gamma-1)(2-\phi^2)+2\gamma|\phi|}.$$

Таблиця 5

$F_i(0,0) > F_i(0,1) > F_i(1,0) \geq F_i(1,1)$	$0 < t \leq t_7$
$F_i(0,0) > F_i(0,1) \geq F_i(1,1) > F_i(1,0)$	$t_7 < t \leq t_8$
$F_i(0,0) > F_i(1,1) > F_i(0,1) > F_i(1,0)$	$t_8 < t < 1$

Точка t_8 існує тільки у випадку відносно невеликої асиметрії ринків, а саме при $\gamma < \frac{2+2|\phi|-\phi^2}{2-\phi^2}$. При $\gamma \geq \frac{2+2|\phi|-\phi^2}{2-\phi^2}$ точка t_8 зникає, тому що виходить за умову покриття: $t_8 \geq 1$.

Проілюструємо аналіз із табл. 5 на рис. 5, де $\gamma = 3/2$, $\phi = -3/4$, $t_7 = 7/15$, $t_8 = 14/19$, $t_{cov}^B = 1$.

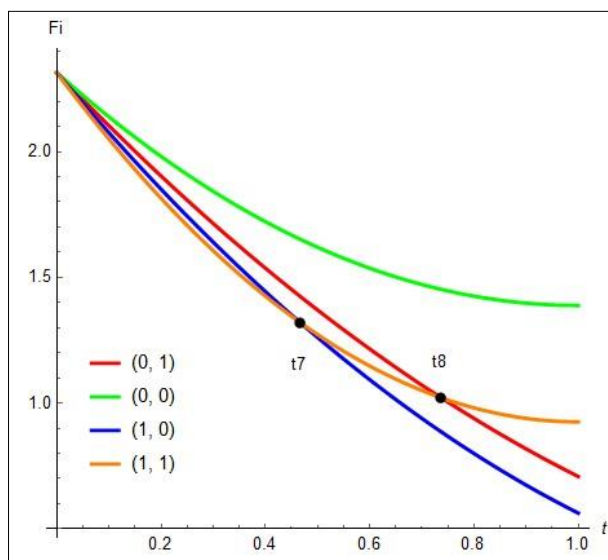


Рис. 5. Прибутки i -ї фірми у рівновазі Бертрана-Неша при взаємодоповнюваних продуктах

Джерело: власна розробка

З рис. 5 випливає, що при взаємодоповнюваності оптимальним варіантом для i -ї фірми є агломерація на L -ринку. Бачимо, що зростання транспортного тарифу посилює вигоди агломерації і при $t > t_8$ i -й фірмі навіть вигідніше агломеруватися на S -ринку, ніж розташуватися окремо на L -ринку.

Рівноваги у грі залежать від співвідношення між асиметрією ринків та взаємодоповнюваністю продуктів.

При $\gamma \geq \frac{2 + 2|\phi| - \phi^2}{2 - \phi^2}$ агломерація на L -ринку є єдиною рівновагою Неша в чистих стратегіях незалежно від транспортного тарифу. При $\gamma < \frac{2 + 2|\phi| - \phi^2}{2 - \phi^2}$ ситуація вже залежить від рівня транспортного тарифу. При $t \leq t_8$ агломерація на L -ринку є рівновагою Неша в чистих стратегіях, оскільки фірми виберуть L -ринок за будь-якого рішення конкурента. При $t > t_8$ у грі виникають дві рівноваги Неша в чистих стратегіях, в яких фірми агломеруються. При цьому агломерація на L -ринку краща для обох фірм і є оптимальною за Парето.

5. Оптимальна стратегія i -ї фірми

На основі проведеного аналізу сформулюємо оптимальну стратегію i -ї фірми за критерієм прибутку.

У ході конкурентної гри фірма обирає місце розташування та вид конкуренції. Ми отримали, що незалежно від виду конкуренції, оптимальним для i -ї фірми є розташування на L -ринку. Вибір оптимального виду конкуренції залежить від продуктової диференціації. При *взаємодоповнюваності* обидві фірми, незалежно від виду конкуренції, розташуються на L -ринку. Прибуток i -ї фірми буде вищим за цінової конкуренції:

$$F_i^B(0,0) - F_i^C(0,0) = \frac{2|\phi|^3(\gamma + (1-t)^2)}{(1-|\phi|)(4-\phi^2)^2} > 0. \quad (12)$$

Висновок (12) збігається з результатом [1].

При *взаємозамінності* i -а фірма також завжди вибере L -ринок. Фірма-конкурент, залежно від ситуації, може вибрати як L -ринок, так і S -ринок. Оптимальний вид конкуренції для i -ї фірми залежить від співвідношення між асиметрією ринків, продуктовою диференціацією та транспортним тарифом. Розглянемо дві ситуації.

1) Агломерація на L -ринку при Курно та Бертрані. Така ситуація виникає, наприклад, при асиметрії: $\gamma \geq 1 + \frac{2\phi}{2 - \phi^2}$. У цьому випадку прибуток i -ї фірми буде вищим за кількісної конкуренції:

$$F_i^C(0,0) - F_i^B(0,0) = \frac{2\phi^3(\gamma + (1-t)^2)}{(1+\phi)(4-\phi^2)^2} > 0. \quad (13)$$

Зазначимо, що висновок (13) також збігається із результатом [1]. Таким чином, при агломерації фірм пріоритет видів конкуренції у просторовій та безпросторовій моделі збігається.

2) Агломерація на L -ринку при Курно та дисперсія $(0, 1)$ при Бертрані. Така ситуація виникає, наприклад, при асиметрії $\gamma < 1 + \phi$ і тарифові $t_6 < t < t_{cov}^B < t_2$. У цьому випадку вибір виду конкуренції визначається співвідношенням:

$$\text{sgn}(F_i^C(0, 0) - F_i^B(0, 1)) = \text{sgn}(t_9 - t),$$

де

$$t_9 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a},$$

$$a = \gamma\phi^2 + (2 - \phi^2)^2 - (1 - \phi^2)(2 - \phi)^2,$$

$$b = 2(1 - \phi)(\gamma\phi(2 + \phi) - (2 + \phi)(2 - \phi^2) + (1 + \phi)(2 - \phi)^2),$$

$$c = (\gamma + 1)((1 - \phi)^2(2 + \phi)^2 - (1 - \phi^2)(2 - \phi)^2).$$

Динаміка прибутків у цій ситуації представлена на рис. 6, де $\gamma = 1,5$, $\phi = 0,8$, $t_6 = 0,25$, $t_{cov}^B = 0,41$, $t_9 = 0,32$, $t_2 = 0,46$.

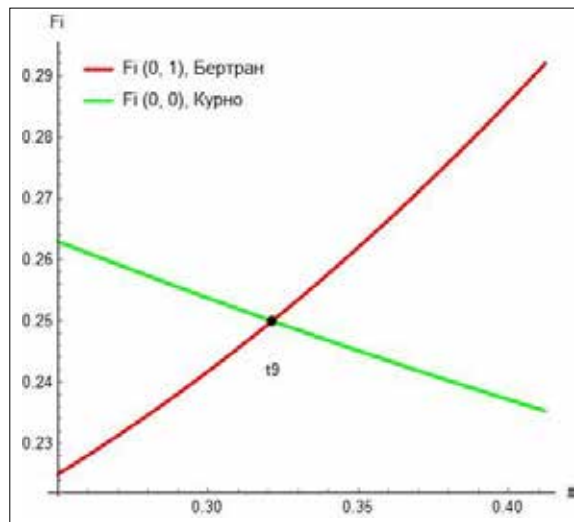


Рис. 6. Порівняльний аналіз видів конкуренції

Джерело: власна розробка

У безпросторовій моделі [1] прибуток Курно при взаємозамінності завжди вище. Це пояснюється тим, що кількісна конкуренція є більш монополістичною, оскільки продажі нижче, а ціни вище. Проте у просторовій моделі можлива зворотна ситуація. Цінова конкуренція (низькі ціни та високі продажі) може бути вигіднішою, якщо фірми розташуються на різних ринках. У цьому випадку зростання транспортного тарифу посилює монополізацію ринків та, відповідно, збільшує прибуток фірм. На рис.6 бачимо, що при транспортному тарифові $t < t_9$ ефект монополізації при агломерації домінує над ефектом монополізації при дисперсії. Зі зростанням тарифу, $t > t_9$, ситуація змінюється.

6. Висновки

В представленій роботі аналізується стратегічна взаємодія фірм за умов просторової диференційованої дуополії з асиметричними ринками. Розглядаються два види конкуренції – кількісна та цінова.

Показано, що незалежно від виду конкуренції та продуктової диференціації фірмі необхідно розташуватися на більшому ринку. При взаємодоповнюваності продуктів фірми завжди прагнуть агломеруватися. При взаємозамінності продуктів фірми прагнуть агломеруватися при великій асиметрії та розташуватися на різних ринках при малій асиметрії ринків.

Отримано, що транспортний тариф істотно впливає на рівноважне розташування фірм. Вплив транспортного тарифу залежить від виду продуктової диференціації. При взаємозамінності зростання транспортного тарифу посилює дисперсійні процеси, а за взаємодоповнюваності – агломераційні процеси.

Показано, що результат [9] про несуттєвий вплив асиметрії ринків на рішення фірм за цінової конкуренції обумовлений повною взаємозамінністю продуктів. У роботі доведено, що за досить високого рівня асиметрії, агломерація на більшому ринку є рівновагою Неша в чистих стратегіях, незалежно від виду продуктової диференціації і виду конкуренції.

Наприкінці відзначимо, що в даній моделі фірми продають за цінами, які перевищують граничні витрати, тобто мають монопольну владу. У сучасній літературі ринки з фірмами, які мають монопольну владу, моделюються, зазвичай, із залученням апарату теорії монополістичної конкуренції [11–14]. Основними елементами моделей монополістичної конкуренції є припущення про любов споживачів до різноманітності, континуумі фірм та свободі входу на ринок. Досліджуються питання міжнародної торгівлі, економічного зростання, розподілу економічної активності, у тому числі і за умов асиметрії [15, 16].

Вважаємо, що в рамках поставленої у статті мети, моделі олігополії Курно та Бертрана все ще зберігають свій потенціал для аналізу стратегічної взаємодії фірм.

ЛІТЕРАТУРА

1. Singh N., Vives X. Price and quantity competition in a differentiated duopoly. *Rand Journal of Economics*. 1984. N 15. Pp. 546–554.
2. Zanchettin P. Differentiated duopoly with asymmetric costs. *Journal of Economics & Management Strategy*. 2006. V. 15. Pp. 999–1015.
3. Anderson S., Neven D. Cournot Competition Yields Spatial Agglomeration. *International Economic Review*. 1991. V. 32. N 4. Pp. 793–808.
4. Hamilton J., Thisse J.-F., Weskamp A. Spatial discrimination, Bertrand vs. Cournot in a model of location choice. *Regional Science and Urban Economics*. 1989. N 19. Pp. 87–102.
5. Hamilton J., Klein J., Sheshinski E., Slutsky S. Quantity Competition in a Spatial Model. *The Canadian Journal of Economics*. 1994. V. 27. N 4. Pp. 903–917.
6. Melnikov S.V. Cournot Competition Yields Spatial Dispersion. *Transport Development*. 2020. V. 1. N 4. Pp. 57–70.

7. Melnikov S.V. Stackelberg-Nash Equilibrium in the Linear City Model. *Automation Remote Control*. 2020. N 81. Pp. 358–365.
8. Sun C.-H. Cournot and Bertrand Competition in a Model of Spatial Price Discrimination with Differentiated Products. *The B.E. of Theoretical Economics*. 2014. N 14. Pp. 251–72.
9. Liang W.J., Hwang H., Mai C.C. Spatial discrimination: Bertrand vs. Cournot with asymmetric demands. *Regional Science and Urban Economics*. 2006. N 36. Pp. 790–802.
10. Andree K., Calaki J. Product differentiation in a spatial Cournot model with asymmetric demand. *Economics Bulletin*. 2011. V. 31. N 2. Pp. 1125–1130.
11. Dixit A., Stiglitz J. Monopolistic Competition and Optimum Product Diversity. *American Economic Review*. 1977. V. 67. N 3. Pp. 297–308.
12. Krugman P.R. Increasing returns, monopolistic competition, and international trade. *Journal of International Economics*. 1979. V. 9. N 4. Pp. 469–479.
13. Behrens K., Murata Y. General equilibrium models of monopolistic competition: A new approach. *Journal of Economic Theory*. 2007. V. 136. N 1. Pp. 776–787.
14. Zhelobodko E., Kokovin S., Parenti M., Thisse J.-F. Monopolistic Competition in General Equilibrium: Beyond the Constant Elasticity of Substitution. *Econometrica*. 2012. V. 80. N 6. Pp. 2765–2784.
15. Behrens K. Asymmetric trade and agglomeration. [Research Report] Laboratoire d'analyse et de techniques économiques (LATEC). 2003. 53 p.
16. Sidorov A.V., Zhelobodko E. V. Agglomeration and Spreading in an Asymmetric World. *Review of Development Economics*. 2013. V. 17. N 2. Pp. 201–219.

REFERENCES

1. Singh, N., & Vives, X. (1984). Price and quantity competition in a differentiated duopoly. *Rand Journal of Economics*, 15, 546–554.
2. Zanchettin, P. (2006). Differentiated duopoly with asymmetric costs. *Journal of Economics & Management Strategy*, 15, 999–1015.
3. Anderson, S., & Neven, D. (1991). Cournot Competition Yields Spatial Agglomeration. *International Economic Review*, 32(4), 793–808.
4. Hamilton, J., Thisse, J.-F., & Weskamp, A. (1989). Spatial discrimination, Bertrand vs. Cournot in a model of location choice. *Regional Science and Urban Economics*, 19, 87–102.
5. Hamilton, J., Klein, J., Sheshinski, E., & Slutsky, S. (1994). Quantity Competition in a Spatial Model. *The Canadian Journal of Economics*, 27(4), 903–917.
6. Melnikov, S.V. (2020). Cournot Competition Yields Spatial Dispersion. *Transport Development*, 1(4), 57–70.
7. Melnikov, S.V. (2020). Stackelberg-Nash Equilibrium in the Linear City Model. *Automation Remote Control*, 81, 358–365.
8. Sun, C.-H. (2014). Cournot and Bertrand Competition in a Model of Spatial Price Discrimination with Differentiated Products. *The B.E. of Theoretical Economics*, 14, 251–72.

9. Liang, W.J., Hwang, H., & Mai, C.C. (2006). Spatial discrimination: Bertrand vs. Cournot with asymmetric demands. *Regional Science and Urban Economics*, 36, 790–802.
10. Andree, K., & Calaki, J. (2011). Product differentiation in a spatial Cournot model with asymmetric demand. *Economics Bulletin*, 31(2), 1125–1130.
11. Dixit, A., & Stiglitz, J. (1977). Monopolistic Competition and Optimum Product Diversity. *American Economic Review*, 67(3), 297–308.
12. Krugman, P.R. (1979). Increasing returns, monopolistic competition, and international trade. *Journal of International Economics*, 9(4), 469–479.
13. Behrens, K., & Murata, Y. (2007). General equilibrium models of monopolistic competition: A new approach. *Journal of Economic Theory*, 136(1), 776–787.
14. Zhelobodko, E., Kokovin, S., Parenti, M., & Thisse, J-F. (2012). Monopolistic Competition in General Equilibrium: Beyond the Constant Elasticity of Substitution. *Econometrica*, 80(6), 2765–2784.
15. Behrens, K. (2003). Asymmetric trade and agglomeration. [Research Report] Laboratoire d'analyse et de techniques économiques (LATEC), 53 p.
16. Sidorov, A.V., & Zhelobodko, E. V. (2013). Agglomeration and Spreading in an Asymmetric World. *Review of Development Economics*, 17(2), 201–219.

**АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТРАДИЦІЙНОЇ ГЕОПОЛІТИКИ
НА ЦІНУ АМЕРИКАНСЬКОГО НАФТОВОГО БАРЕЛЯ**

**Л.В. Пізінцалі¹, О.М. Шумило², О.І. Россомаха³, Н.І. Александровська⁴,
О.А. Россомаха⁵, Т.В. Рабоча⁶**

¹к.т.н., доцент,

доцент кафедри технічного обслуговування і ремонту суден,
Навчально-науковий інститут морського флоту
Одеського національного морського університету, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-8046-0917

²к.т.н., професор,

проректор з навчально-педагогічної роботи,
доцент кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації,
Навчально-науковий інститут морського флоту
Одеського національного морського університету, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0003-0574-1951

³к.т.н.,

старший викладач кафедри технічного обслуговування і ремонту суден,
доцент кафедри навігації і керування суден,
Навчально-науковий інститут морського флоту
Одеського національного морського університету, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-4425-2192

⁴к.т.н., доцент,

доцент кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації,
доцент кафедри навігації і керування суден,
заступник директора,
Навчально-науковий інститут морського флоту
Одеського національного морського університету, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0001-6591-2068

⁵начальник навчального відділу,

старший викладач кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації,
Навчально-науковий інститут морського флоту
Одеського національного морського університету, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-0230-9453

⁶к.т.н., доцент,

доцент кафедри забезпечення військ (сил),
Військова академія (м. Одеса), Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-9475-334X

Анотація

Відомо, що ціна нафти, останні десятиліття, є основним чинником формування бюджету будь-якої країни, фактором розвитку ділової активності держави.

Автори статті звертають увагу на те, що побудова прогнозу розвитку ринку та можливих сценаріїв поведінки нафти на міжнародній арені необхідні для грамотного планування державної політики та формування реалістичного бюджету будь-якої держави.

Автори не ставили за мету дослідження повноцінне оцінювання впливу всього комплексу факторів на коливання ціни на нафту в поточній кризі, а хотіли лише спробувати прояснити роль традиційної геополітики (військових конфліктів, терористичної активності) на сучасному етапі розвитку нафтового ринку за останні п'ять років, що і стало метою даного аналізу.

Аналіз літератури показав, що на теперішній час відсутні роботи, що враховують вплив військово вторгнення росії³ в Україну на ціну бареля.

Стаття ґрунтуються на якісних методах наукового пізнання.

Автори даної статті застосовують в основному історичний метод, порівняльний аналіз, включаючи при цьому мінімальний аналіз статистичних даних для підтвердження своїх аргументів.

Отже, виявлення основних причин зміни цін на нафту, адекватна оцінка їхньої значущості, а також побудова прогнозу розвитку ринку та можливих сценаріїв поведінки на міжнародній арені є особливо актуальними.

Результати дослідження показали, що традиційна геополітика мала різний ступінь впливу в різні роки дослідження. Вона впливає на ціну бареля, але її роль у деякі періоди є перебільшена.

Ключові слова: *традиційна геополітика, ціна нафти, барель, військові конфлікти, ризики, динаміка цін*

³Написання з маленької літери вказує на велику неповагу авторів до держави-агресора.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TRADITIONAL GEOPOLITICS ON THE PRICE OF AMERICAN OIL BARREL

L.V. Pizintali¹, O.M. Shumylo², O.I. Rossomakha³, N.I. Aleksandrovska⁴,
O.A. Rossomakha⁵, T.V. Rabocha⁶

¹PhD, Associate Professor,

Associate Professor at the Department of Ship Maintenance and Repair,
*Educational and Scientific Institute of the Navy
of Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-8046-0917*

²PhD, Professor,

Vice-rector for Educational and Pedagogical Work,
Associate Professor at the Department of Ship Power Plants and Technical Operation,
*Educational and Scientific Institute of the Navy
of Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-0574-1951*

³PhD,

Senior Lecturer at the Department of Ship Maintenance and Repair,
Associate Professor at the Department of Navigation and Control of Ships,
*Educational and Scientific Institute of the Navy
of Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-4425-2192*

⁴PhD, Associate Professor,

Associate Professor at the Department of Ship Power Plants and Technical Operation,
Associate Professor at the Department of Navigation and Maritime Safety
(Navigation and Control of Ships),

Head's Assistant,
*Educational and Scientific Institute of the Navy
of Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine*
ORCID ID: 0000-0001-6591-2068

⁵Head of the Educational Department,
Senior Lecturer at the Department of Ship Power Plants and Technical Operation,
Head's Assistant,

*Educational and Scientific Institute of the Navy
of Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine*
ORCID ID: 0000-0002-0230-9453

⁶PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Troops (Forces)
Odesa Military Academy, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-9475-334X

Summary

It is known that the price of oil, in recent decades, is the main factor in the formation of the budget of any country, a factor in the development of business activity of the state.

The authors of the article draw attention to the fact that the construction of a market development forecast and possible scenarios of behavior on the international arena are necessary for competent planning of state policy and the formation of a realistic budget of any state.

The authors did not set as the goal of the study a full assessment of the impact of the entire complex of factors on oil price fluctuations in the current crisis, but only wanted to try to clarify the role of traditional geopolitics (military conflicts, terrorist activity) at the current stage of the development of the oil market over the past five years, which and became the goal of this analysis.

The analysis of the literature showed that there are currently no works that take into account the impact of Russia's³ military invasion of Ukraine on the price of a barrel.

The article is based on qualitative methods of scientific knowledge.

The authors of this article mainly use a historical method, a comparative analysis, including at the same time a minimal analysis of statistical data to support their arguments.

Therefore, the identification of the main reasons for changes in oil prices, an adequate assessment of their significance, as well as the construction of a market development forecast and possible scenarios of behavior in the international arena are particularly relevant.

The results of the study showed that traditional geopolitics had different degrees of influence in different years of the study. It affects the barrel, but its role in some periods is exaggerated.

Key words: *traditional geopolitics, oil price, barrel, military conflicts, risks, price dynamics*

³Such writing indicates the authors' great disrespect for the aggressor state.

Вступ. Прикладами геополітичних факторів впливу на ціну американського нафтового бареля (далі: барель) є військові конфлікти, політична нестабільність в державах-експортерах, терористична активність, санкції. Починаючи з 1970-х років дослідження доводять, що геополітичні ризики впливають на поведінку нафтового ринку.

Геополітичні ризики змінюють очікування інвесторів по відношенню до ринкової кон'юнктури як короткотривалої, так і довготривалої перспективи. Крім того, геополітичні ризики впливають на стабільність контрактних відношень, управління бізнесом та регулювання ринком.

Відомо, що ціна нафти, останні десятиліття, є основним чинником формування бюджету будь-якої країни, фактором розвитку ділової активності держави, гарантом соціально-економічної стабільності.

Автори статті вже звертали увагу в роботі [1] на те, що побудова прогнозу розвитку ринку та можливих сценаріїв поведінки на міжнародній арені необхідні для грамотного планування державної політики та формування реалістичного бюджету будь-якої держави.

Отже, виявлення основних причин зміни цін на нафту, адекватна оцінка їхньої значущості, а також побудова прогнозу розвитку ринку та можливих сценаріїв поведінки на міжнародній арені є особливо актуальними.

Автори підкреслюють, що сьогодні, вагомих вплив на ціну бареля мають військові конфлікти (традиційна геополітика⁴), політична нестабільність в державах-експортерах, терористична активність, санкції в світі. Автори згодні з думкою багатьох дослідників, що діяльність ОПЕК зазвичай розглядається як основний геополітичний чинник, який істотно впливає на формування ціни на нафту.

Хочеться нагадати, що **традиційна геополітика**⁴ є «географічним розумом» держави; акцентує увагу на військово-політичну могутність держави і домінуючу роль географічних чинників у захопленні чужих територій [2].

Ціль дослідження. Автори не ставлять за мету дослідження повноцінне оцінювання впливу всього комплексу факторів на коливання ціни на нафту в поточній кризі, а хочуть спробувати прояснити лише роль традиційної геополітики (військових конфліктів, терористичної активності) на сучасному етапі розвитку нафтового ринку за останні п'ять років. Це і є метою дослідження.

Аналіз літератури. Починаючи з 70-х років минулого століття дослідження геополітичних факторів формування ринків нафти та встановлення на ньому цін є одним із важливих напрямів у політичній, а також економічній та економетричній науках.

Найчастіше дослідження знаходяться на стику цих трьох наук і використовують методи як кількісного, так і якісного аналізу для максимально повного обліку всіх можливих факторів, що впливають на розвиток нафтового ринку.

У статті [3] розглядається історія нафтової промисловості з особливим акцентом на події, що пов'язані зі значними змінами ціни на нафту. Хоча нафта використовувалася по-іншому і була значно менш важливою в економічному відношенні у XIX столітті ніж сьогодні, існують цікаві паралелі між подіями тієї епохи та подіями XXI століття. Серед розглянутих ключових нафтових потрясінь після Другої світової війни: Суецька криза 1956 – 57, Іранська революція 1978 – 1979, Ірано-іракська війна (1980 р.), перша війна в Перській Затоці в 1990 – 91 роках. У 2002 – 2003 рр. – вторгнення США в Ірак. Автор приходять до висновків, що геополітичні події в державах – експортерах нафти значно впливають на динаміку її ціни.

У роботі [4] досліджено вплив війни та тероризму на коваріацію між цінами на нафту та індексами чотирьох основних фондових ринків – американського

S&P500, європейського DAX, CAC40 і FTSE100 – за допомогою нелінійних моделей типу BEKK–GARCH. Отримані дані показують, що на коваріацію між доходами від акцій і нафти впливає війна. Орієнтовне пояснення полягає в тому, що дві війни, розглянуті тут, схиляють інвесторів і ринкових агентів до більш глибоких і довготривалих впливів на глобальні ринки. З іншого боку, терористичні інциденти, які є одноразовими непередбаченими потрясіннями безпеки, впливають лише на спільний рух між CAC40, DAX та нафтовими доходами, і не спостерігається істотного впливу на співвідношення між S&P500, FTSE100 та нафтовими доходами. Цю різницю в реакції можна умовно інтерпретувати як вказівку на те, що останні ефективніше поглинають наслідки терористичних атак.

У роботі [5] – автори висувають у своєму дослідженні постулат про те, що геополітична нестабільність була однією з найбільш помітних причин підвищення цін на нафту за останні тридцять років. Найбільш віддаленими наслідками, на думку авторів, стала політична нестабільність на Близькому Сході та в Ірані у 1973 та 1978 рр., що привело до першої та другої кризи ціни на нафту.

У роботі [6] автори присвятили увагу аналізу впливу такого фактору як терористична активність. Це дослідження зосереджено на впливі тероризму на нафтові ринки та вивчає нові фактори ризику, включаючи відстань між місцем нападу та найближчими нафтовими об'єктами, тип нападу чи організацію, яка вчинила подію, і розмір нападу. Автори зосередили увагу на терористичних атаках на Близькому Сході, та виявили, що бомбардування, події з великими жертвами та події поблизу нафтових об'єктів призводять до великого аномального зростання цін на сирю нафту. Ці нові важливі висновки допомагають краще зрозуміти вплив тероризму на ціни сирової нафти.

У роботі [7] автори аналізують поєднані цикли геополітичного насильства на Близькому Сході та цін на нафту. Автори зосереджуються на одному конкретному факторі: які геополітичні події, швидше за все, призведуть до тривалих перебоїв у постачанні? Використовуючи дискретний вейвлет-аналіз видобутку нафти на рівні країни, вони виявили, що військові конфлікти, що руйнують виробничі установки або порушують мережі транспортування нафти, є найбільш значущими передумовами тривалих, довгострокових збоїв у постачанні нафти, тоді як ненасильницька зміна режиму, внутрішньополітична боротьба та низький рівень геополітичної напруженості мають менш тривалий вплив.

Робота [8] – у цій статті досліджується взаємозв'язок між збройними та цивільними конфліктами та цінами на нафту. Якщо конфлікти загрожують надійності постачання нафти, навіть якщо перебоїв насправді не відбувається, це має відобразитися в цінах, якщо очікування відповідають відповідним чином. З цією метою, використовуючи щомісячні дані з 1859 року, автор проаналізував часові ряди інтервенцій, щоб вивчити вплив 32 різних геополітичних подій на реальні ціни на нафту.

У статті [9] досліджується поведінка цін на сирю нафту, державні облігації та індекси фондового ринку в умовах спалахів серйозних міжнародних криз і війн. Використовуючи дослідження подій постійної середньої прибутковості, автори показують, що ці події пов'язані з позитивними та значними ненормальними прибутками від нафти та облігацій, що означає, що ці два класи активів можуть потенційно

захистити акціонерів від різкого падіння вартості акцій під час міжнародних криз. Офіційний аналіз безпечної гавані підтверджує це розуміння. Такі зміни цін можуть відображати перерозподіл коштів між класами активів у відповідь на події, а також зміни попиту на нафту через запобіжні, спекулятивні та військові мотиви.

Прогнозування розвитку ринку нафти є ще одним напрямом досліджень.

Так в роботі [10] автори роблять емпіричні висновки, які вказують на зв'язок війн та коливання цін на нафту. У роботі [11] автори вказують: «Ми вивчаємо динамічний взаємозв'язок між цінами на нафту і заснованими на новинах індексами глобальних геополітичних ризиків (GPR), а також складовим їх заходом для країн з економікою, що розвивається, яку ми розробляємо за допомогою усереднення динамічної моделі (DMA). Наші емпіричні дані показують, що глобальні GPR, пов'язані з війнами, є найбільш точними в прогнозуванні прибутковості нафти в короткостроковій перспективі, тоді як складові GPR, отримані від ринків, що розвиваються, відносно краще прогнозують прибутковість нафти в середньостроковій і довгостроковій перспективі».

Також існують дослідження, що визнають важливість геополітичних факторів у прогнозуванні цін на нафту, проте наголошують на складності їх грамотного обліку та ставлять під питання реалістичність абсолютно точного передбачення геополітичних подій. У роботі [12] автори зазначають, що, згідно з історичними даними, на практиці зрушення у попиті на запаси, як правило, виникають лише тоді, коли геополітична нестабільність збігається з очікуваннями високого попиту на сиру нафту та обмежених поставок нафти. Навпаки, тільки геополітична напруженість не впливатиме на ціну нафти, поки запаси нафти суттєво перевищують очікуваний попит.

Аналіз літератури показав, що на теперішній час відсутні роботи, що враховують вплив військового вторгнення в Україну на ціну американського нафтового бареля.

Матеріали та методи.

Стаття ґрунтується на якісних методах наукового пізнання.

Автори даної статті застосовують в основному історичний метод, порівняльний аналіз, включаючи при цьому мінімальний аналіз статистичних даних для підтвердження своїх аргументів.

За даними [13], сьогодні на політичній карті світу сформувалося вісім основних гарячих точок що впливають на світовий ринок нафти: Сирійська Арабська республіка, Лівія, Алжир, Ємен, Ісламська Республіка Іран, Ірак, Венесуела, Північна Корея. Автори стверджують, що геополітичні ризики значно посилені ще однією точкою – воєнним вторгненням в Україну. Розвиток подій у цих регіонах може кардинально змінити поточну траєкторію руху ціни на барель.

Автори провели аналіз факторів впливу традиційної геополітики на ціну бареля за останні п'ять років (окремо за 2018, 2019, 2020, 2021 та 2022 (січень-серпень) роки) та врахували геополітичні ризики, що пов'язані з воєнним вторгненням в Україну. Результати цього аналізу представлено на рисунках 1 – 4, які були проведені на підставі даних [14 – 19].

Проведений авторами аналіз впливу військових операцій, терактів, воєнних переворотів, війн за даними інформаційного веб-порталу minfin.com.ua; BP Statistical Review of World Energy та Investing.com, біржа ICE дозволив скласти загальну динаміку їх впливу на ціну бареля за останні 5 років в цілому (рис. 5, 6).

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ
№ 3(14), 2022



Рис. 1. Динаміка цін барелю у 2018 році

Розроблено авторами на основі даних [14]

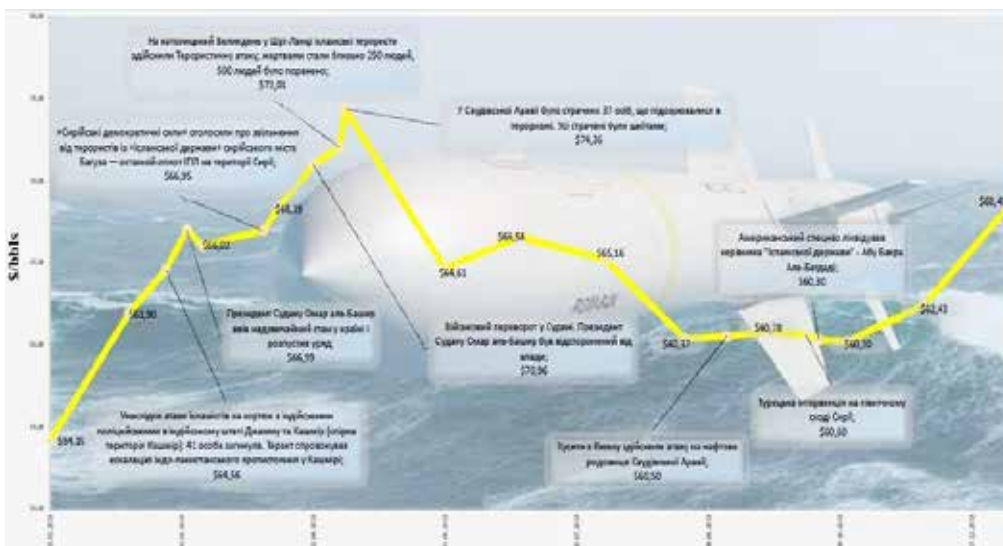


Рис. 2. Динаміка цін барелю у 2019 році

Розроблено авторами на основі даних [15]

Так, в умовах війни в Україні, у березні 2022 року, ціна на нафту Brent досягла найвищого значення за 13 років і сягнула \$139 за барель і \$130,5 за West Texas Intermediate (WTI) [18].

У своєму відео зверненні 5 березня 2022 року, український президент Володимир Зеленський закликав міжнародну спільноту бойкотувати російські нафтопродукти [20].

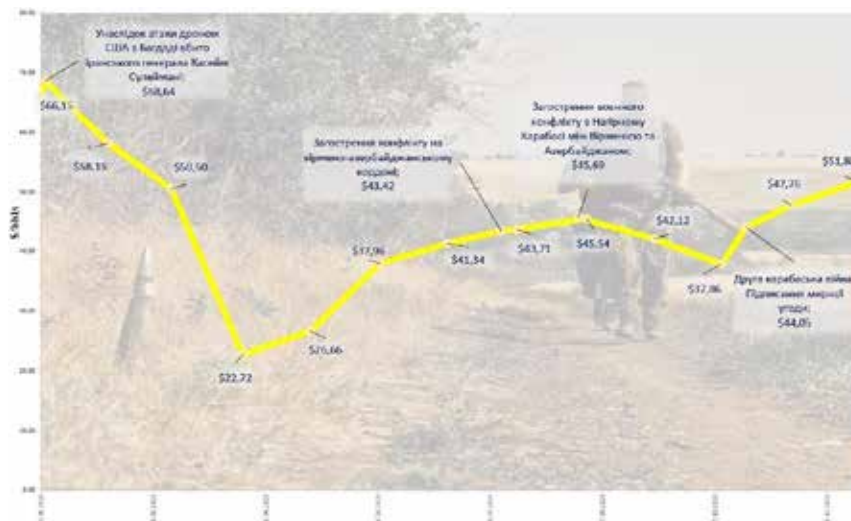


Рис. 3. Динаміка цін бареля у 2020 році
Розроблено авторами на основі даних [16]



Рис. 4. Динаміка цін бареля у 2021 році
Розроблено авторами на основі даних [17]

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ
№ 3(14), 2022

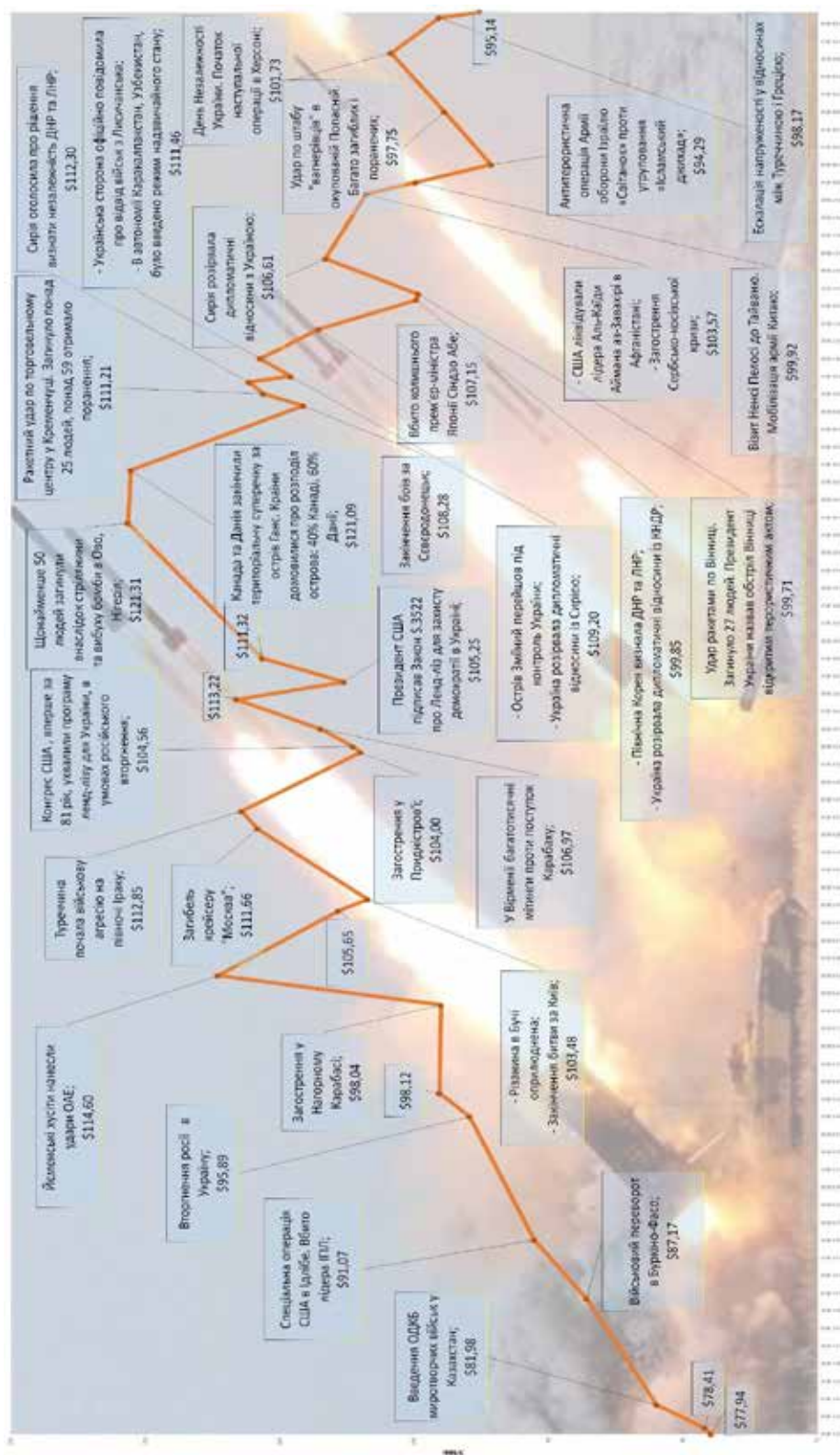


Рис. 5. Динаміка цін барелю у 2022 році
Розроблено авторами на основі даних [18; 19]

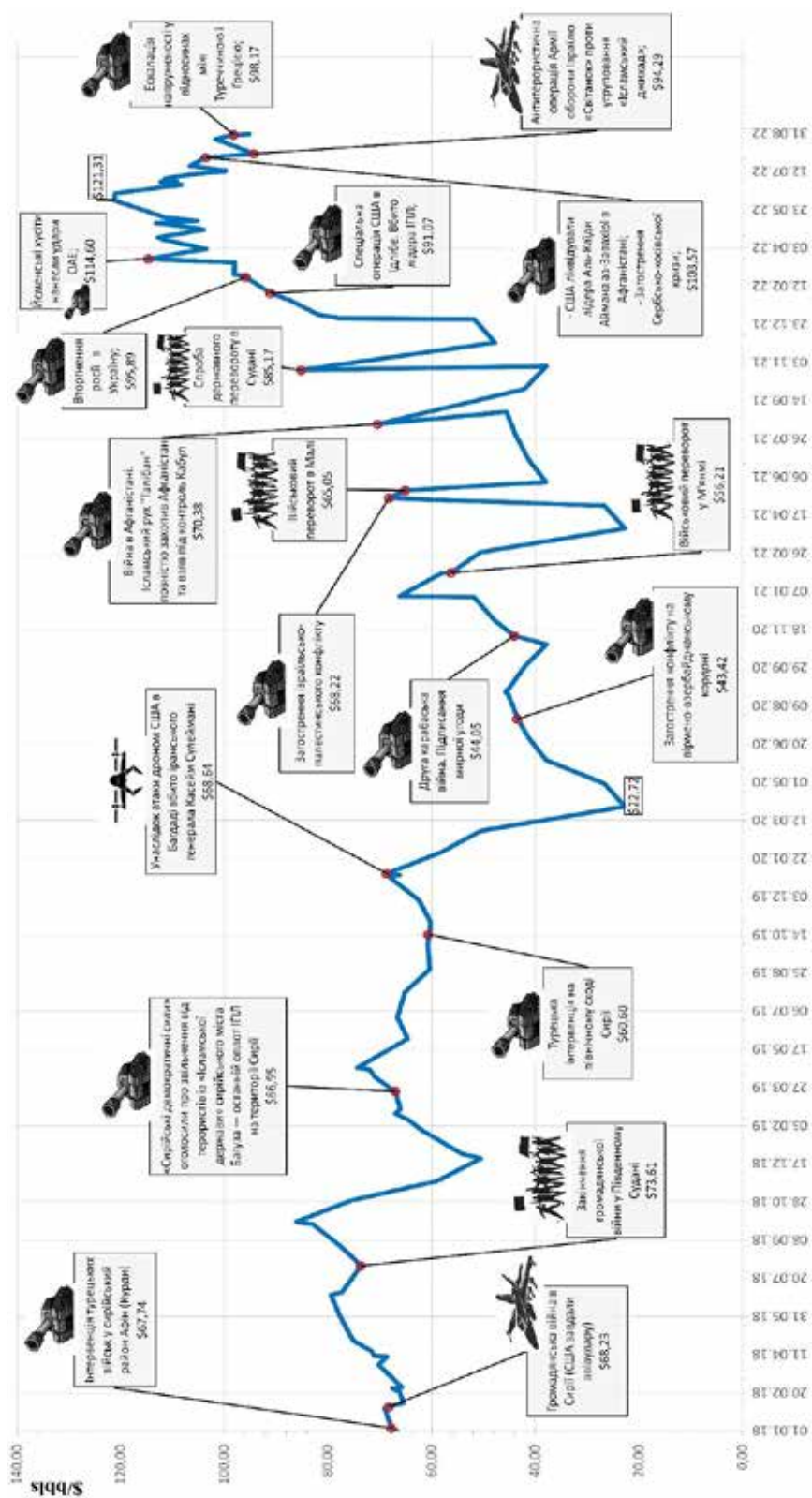


Рис. 6. Ціна барелів і традиційна геополітика за останні п'ять років
Розроблено авторами на основі даних [14–18]

Європейська Комісія розглянула шляхи обмеження залежності від російського викопного палива, які були спрямовані на диверсифікацію енергопоставок, інвестиції у відновлювані джерела енергії, покращення енергоефективності. А Сполучені Штати розглянули можливість відмови від імпорту російської нафти [21].

Згідно даних Reuters, ціни на нафту стабілізувались у серпні 2022 р. після того, як Міжнародне енергетичне агентство підвищило прогноз зростання попиту на нафту на цей рік, оскільки стрімке зростання цін на газ змушує деяких споживачів переходити на інші види палива, зокрема нафту. Ф'ючерси на нафту марки Brent знизилися до \$97,33 за барель, на нафту WTI до \$91,84 за барель [22].

Результати і обговорення. На тлі запровадження антиросійських санкцій через військову агресію в Україні відмічено стрибок цін на нафту. Так, в умовах війни в Україні, у березні 2022 року ціна на нафту Brent досягла найвищого значення за 13 років і сягнула \$139 за барель і \$130,5 за WTI, а вартість квітневого ф'ючерсу еталонного північноморського сорту Brent піднімалася до \$105 за барель, американського сорту WTI – до \$98 за барель, зростання становило близько 5%. У серпні, ф'ючерси на нафту марки Brent знизилися до \$97,33 за барель, на нафту WTI до \$91,84 за барель [21; 22].

Несподівано спалахуючи у різних регіонах планети, осередки воєнної напруженості безцеремонно грають із барелем нафти.

Автори статті підкреслюють, що:

- до несподіваних геополітичних зигзагів неможливо підготуватися;
- їх неможливо заздалегідь прорахувати чи спланувати;
- від них неможливо повністю застрахуватися;
- попри консенсус-прогнози «геополітичні сюрпризи» раптово розвертають нафтовий ринок у протилежний бік.

Водночас автори висловлюють думку, що у тривалішій перспективі чинники ризику переважають нинішній підвищувальний потенціал, що вносить дуже високий рівень невизначеності.

Висновки. На підставі проведеного аналізу впливу факторів традиційної геополітики, автори зробили наступні висновки:

1. Традиційна геополітика мала різний ступінь впливу в різні періоди досліджень. На думку авторів, у 2018 році вплив на ціну бареля був значним, фактично визначальним, потім неухильно скорочувався, поступаючись економічним детермінантам; у 2019 – 2020 рр. – ступінь впливу незначний; у 2021 – 2022 рр. – ступінь впливу на ціну бареля був значним, фактично визначальним.

2. Проведений авторами статті аналіз впливу військових конфліктів, терористичної активності, підтверджує, що традиційна геополітика впливає на барель, але її роль у деякі періоди є перебільшена.

3. Ключовою особливістю впливу геополітичних факторів на ситуацію на нафтовому ринку є опосередкованість: очікування щодо майбутніх подій, які теоретично можуть призвести до зміни ринкових умов, насамперед пропозиції нафти, мають більший вплив на ціни, ніж самі ці події.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пізінцалі Л.В., Шумило О.М., Россомаха О.І., Александровська Н.І., Россомаха О.А., Рабоча Т.В. Аналіз впливу традиційної геополітики на ціну нафти та суднового палива. *The 2nd International scientific and practical conference – Modern research in world science* (May 15–17, 2022) SPC – Sci-conf.com.ua, Lviv, Ukraine. 2022. 1785 p. (P. 506–511).
2. Геополітика. *Вікіпедія*. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Геополітика> (дата звернення 10.05.2022).
3. Hamilton J. (2011) Historical Oil Shocks. *Routledge Handbook of Major Events in Economic History* / R.E. Parker, R. Whaples (eds). N. Y. : Routledge Taylor and Francis Group. Helle Reijo K. (1987) Spatial Expansion of Oil Prospecting and Geopolitical Balance. *GeoJournal*. Vol. 14.2. P. 211–216.
4. Kollias C., Kyrtou S., Papadamou S. (2013) The effects of terrorism and war on the oil price–stock index relationship. *Energy Economics*. Vol. 40. P. 743–752.
5. Kesicki F., Remme U., Blesl M., Fahl U., Voß A. (2009) The third oil price surge – What is different this time and what are possible future oil price developments? *Working Paper*. Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/d0f0/6a0463ef0c670a8f6b49ee1ede2ff63764fb.pdf>.
6. Orbaneja J.R.V., Iyer S.R., Simkins B.J. (2018) Terrorism and oil markets: a cross-sectional evaluation. *Finance Research Letters*. Vol. 24. P. 42–48.
7. El-Gamal M., Jaffe A. (2018) The coupled cycles of geopolitics and oil prices. *Economics of Energy & Environmental Policy*. *International Association for Energy Economics*. Vol. 0. No. 7. P. 1–15.
8. Noguera-Santaella J. (2016) Geopolitics and the oil price. (2016) *Economic Modelling*. *Elsevier*. Vol. 52 (PB). P. 301–309.
9. Omar A.M., Wisniewski T.P., Nolte S. (2017) Diversifying away the risk of war and cross-border political crisis. *Energy Economics*. Vol. 64. P. 494–510.
10. Dermirer R., Gupta R., Suleman T., Wohar M.E. (2018) Time-varying rare disaster risks, oil returns and volatility. *Energy Economics*. Vol. 75. P. 239–248.
11. Plakandaras V., Gupta R., Wong W.K. (2019) Point and density forecasts of oil returns: the role of geopolitical risks. *Resource Policy*. Vol. 62. P. 580–587.
12. Baumeister C., Kilian L. (2016) Forty Years of Oil Price Fluctuations: Why the Price of Oil May Still Surprise Us. *The Journal of Economic Perspectives*. Vol. 30. No. 1. P. 139–160.
13. 8 геополитических сюрпризов для нефти. *Forbes*. URL: <https://m.forbes.kz/energetics> (дата звернення 08.05.2022).
14. 2018. *Вікіпедія*. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/2018> (дата звернення 07.05.2022).
15. 2019. *Вікіпедія*. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/2019> (дата звернення 07.05.2022).
16. 2020. *Вікіпедія*. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/2020> (дата звернення 08.05.2022).

17. 2021. *Вікіпедія*. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/2021> (дата звернення 08.05.2022).
18. 2022. *Вікіпедія*. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/2022> (дата звернення 08.05.2022).
19. Російські окупанти двома ракетами обстріляли торговий центр у Кременчукі. URL: <https://tsn.ua/ato/rosiyski-okupanti-raketami-obstrilyali-tc-u-kremenchuku-vseredini-bulo-ponad-tisyachu-lyudey-zelenskiy-2097307.html> (дата звернення 03.08.2022).
20. Зеленський закликав світ бойкотувати торговельні відносини з РФ: «Хай війна їх нагодує». URL: <https://www.unian.ua/politics/zelenskiy-zaklikav-svit-boykotuvati-torgovelni-vidnosini-z-rf-hay-viyna-jih-nagoduye-novini-ukrajina-11732407.html> (дата звернення 09.09.2022).
21. Ціни на нафту злетіли на тлі обговорень можливих нових обмежень щодо РФ. URL: <https://ukrainian.voanews.com/a/6473274.html> (дата звернення 01.09.2022).
22. Ціни на нафту стабілізувались: МЕА підвищило прогноз зростання попиту. URL: <https://www.epravda.com.ua/news/2022/08/11/690287/> (дата звернення 01.09.2022).

REFERENCES

1. Pizintsali L.V., Shumylo O.M., Rossomakha O.I., Aleksandrovska N.I., Rossomakha O.A., Rabocha T.V. Analysis of the influence of traditional geopolitics on the price of oil and marine fuel [Analiz vplyvu tradytsiinoi heopolytyky na tsinu nafty ta sudnovoho palyva] // The 2 nd International scientific and practical conference – *Modern research in world science* (May 15-17, 2022) SPC – Sci-conf.com.ua, Lviv, Ukraine. 2022. 1785 p. (R. 506 – 511). [In Ukrainian].
2. Geopolitics. *Wikipedia* [Heopolytyka – Vikipediia]. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Heopolytyka> (data zvernennia 10.05.2022). [In Ukrainian].
3. Hamilton J. (2011) Historical Oil Shocks. *Routledge Handbook of Major Events in Economic History* / R.E. Parker, R. Whaples (eds). N. Y. : Routledge Taylor and Francis Group. Helle Reijo K. (1987) Spatial Expansion of Oil Prospecting and Geopolitical Balance. *GeoJournal*. Vol. 14.2. P. 211–216.
4. Kollias C., Kyrtsoy C., Papadamou S. (2013) The effects of terrorism and war on the oil price—stock index relationship. *Energy Economics*. Vol. 40. P. 743–752.
5. Kesicki F., Remme U., Blesl M., Fahl U., Voß A. (2009) The third oil price surge – What is different this time and what are possible future oil price developments? *Working Paper*. Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy. <https://pdfs.semanticscholar.org/d0f0/6a0463ef0c670a8f6b49ee1ede2ff63764fb.pdf>.
6. Orbaneja J.R.V., Iyer S.R., Simkins B.J. (2018) Terrorism and oil markets: a cross-sectional evaluation. *Finance Research Letters*. Vol. 24. P. 42–48.
7. El-Gamal M., Jaffe A. (2018) The coupled cycles of geopolitics and oil prices. *Economics of Energy & Environmental Policy*. *International Association for Energy Economics*. Vol. 0. No. 7. P. 1–15.

8. Noguera-Santaella J. (2016) Geopolitics and the oil price. (2016) *Economic Modelling*. Elsevier. Vol. 52 (PB). P. 301–309.
9. Omar A.M., Wisniewski T.P., Nolte S. (2017) Diversifying away the risk of war and cross-border political crisis. *Energy Economics*. Vol. 64. P. 494–510.
10. Dermirer R., Gupta R., Suleman T., Wohar M.E. (2018) Time-varying rare disaster risks, oil returns and volatility. *Energy Economics*. Vol. 75. P. 239–248.
11. Plakandaras V., Gupta R., Wong W.K. (2019) Point and density forecasts of oil returns: the role of geopolitical risks. *Resource Policy*. Vol. 62. P. 580–587.
12. Baumeister C., Kilian L. (2016) Forty Years of Oil Price Fluctuations: Why the Price of Oil May Still Surprise Us. *The Journal of Economic Perspectives*. Vol. 30. No. 1. P. 139–160.
13. 8 geopolitical surprises for oil [8 heopolytycheskykh siurpryzov dlia nefty] – *Forbes*.
14. 2018. *Wikipedia* [2018 – Vikipediia] URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/2018> (access 07.05.2022).
15. 2019. *Wikipedia* [2019 – Vikipediia] URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/2019> [In Ukrainian]. (access 07.05.2022).
16. 2020. *Wikipedia* [2020 – Vikipediia] URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/2020> [In Ukrainian]. (access 08.05.2022).
17. 2021. *Wikipedia* [2021 – Vikipediia] URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/2021> [In Ukrainian]. (access 08.05.2022).
18. 2022. *Wikipedia* [2022 – Vikipediia]. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/2022> [In Ukrainian]. (access 08.05.2022).
19. Russian occupiers fired two rockets at a shopping center in Kremenchuk [Rosiiski okupanty dvoma raketamy obstrilialy torhovyi tsentr u Kremenchuki]. URL: <https://tsn.ua/ato/rosiyski-okupanti-raketami-obstrilyali-tc-u-kremenchuku-vseredini-bulo-ponad-tisyachu-lyudey-zelenskiy-2097307.html> [In Ukrainian]. (access 03.08.2022).
20. Zelensky called on the world to boycott trade relations with the Russian Federation: “Let the war feed them” [Zelenskyi zaklykav svit boikotuvaty torhovelni vidnosyny z RF: “Khai viina yikh nahoduie”]. URL: <https://www.unian.ua/politics/zelenskiy-zaklykav-svit-boikotuvati-torgovelni-vidnosini-z-rf-hay-viyna-jih-nagodye-novini-ukrajina-11732407.html> [In Ukrainian]. (access 09.09.2022).
21. Oil prices soared amid discussions of possible new restrictions on the Russian Federation [Tsiny na naftu zletily na tli obhovoren mozhlyvykh novykh obmezhen shchodo RF]. URL: <https://ukrainian.voanews.com/a/6473274.html> [In Ukrainian]. (access 01.09.2022).
22. Oil prices stabilized: the IEA increased the demand growth forecast. [Tsiny na naftu stabilizovalys: MEA pidvyshchylo prohnoz zrostannia popytu]. URL: <https://www.epravda.com.ua/news/2022/08/11/690287/> [In Ukrainian]. (access 01.09.2022).

МЕНЕДЖМЕНТ

UDC 005.4: 656.025.4/.6:656.073.5

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.03>

MECHANISMS OF PROJECT MANAGEMENT OF DIGITAL TRANSFORMATION OF INTERNATIONAL MULTIMODAL TRANSPORT

I.A. Babayev¹, J.I. Babayev²

¹Doctor of Science (Engineering), Professor,
President of the Azerbaijan Project Management Association (AzPMA)
Azerbaijan Project Management Association (AzPMA), Baku, Azerbaijan
ORCID ID: 0000-0002-1787-7859

² Dissertator
Azerbaijan Project Management Association (AzPMA), Baku, Azerbaijan
ORCID ID: 0000-0003-4633-8261

Summary

Introduction. The use of digital transformation mechanisms in international multimodal transportation plays an important role in ensuring the development of a sustainable economy. The widespread use of digital processes in international transport operations, which have become an integral part of our daily lives and economic activities and are becoming increasingly important during the global pandemic, plays an invaluable role in improving efficiency in this sphere and organizing transport procedures that meet modern requirements. Given the important role of customs and border crossing procedures in the international transport chain, the application of digital mechanisms in the customs system is essential. **Purpose.** The purpose of the study: to develop a mechanism for managing digitalization projects of the international system of multimodal transportation based on the concept of sustainable development. **Results.** The results of the study are as follows. During the study, it was found that the full digitalization of efficient, safe and fast multimodal transportation requires, first of all, the use of electronic technologies and electronic documents by all parties involved in the transportation process. Problems that hinder the effective implementation of digital transformation projects in international multimodal transportation were identified. Such shortcomings include the fact that international transport documentation for some modes of transport is partially electronic, transport documents required for customs control in multimodal operations with various modes of transport are submitted in paper format. **Conclusions.** Despite the fact that customs declarations are electronic, the use of paper transport documents makes it impossible to fully use electronic accompanying documents in customs clearance. Given the above information, it can be concluded that it is important to introduce digitalization projects in the transport industry by organizing the process of electronicization of waybills and exchanging

them with electronic information systems of customs authorities to unite the competent transport authorities and participants in the cargo delivery system into an integrated digital system for providing multimodal transportation.

Key words: digitalization project, multimodal transportation, electronic customs declaration.

МЕХАНІЗМИ УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТАМИ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ МІЖНАРОДНИХ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

І.А. Бабасв¹, Д.І. Бабасв²

¹д.т.н., професор, президент Азербайджанської Асоціації Управління Проєктами (AzPMA)

Азербайджанська Асоціація Управління Проєктами (AzPMA), Баку, Азербайджан
ORCID ID: 0000-0002-1787-7859

²дисертант

Азербайджанська Асоціація Управління Проєктами (AzPMA), Баку, Азербайджан
ORCID ID: 0000-0003-4633-8261

Анотація

Вступ. Використання механізмів цифрової трансформації стосовно міжнародних мультимодальних перевезень має особливе значення для забезпечення стійкої економіки. Широке використання цифрових процесів у міжнародних транспортних операціях, які стали невід'ємною частиною нашого повсякденного життя та економічної діяльності та набувають все більшого значення під час глобальної пандемії, відіграє неоціненну роль у підвищенні ефективності в цій галузі та організації транспортних процедур, що відповідають сучасним вимогам. Враховуючи важливу роль митних процедур у міжнародному ланцюзі перевезень, застосування цифрових механізмів у митній системі має важливе значення. **Мета.** Розробка механізму управління проєктами цифровізації міжнародної системи мультимодальних перевезень з урахуванням концепції сталого розвитку. **Результати дослідження.** Було встановлено, що повна цифровізація ефективних, безпечних та швидких мультимодальних перевезень потребує насамперед використання електронних технологій та електронних документів усіма сторонами, які беруть участь у процесі перевезення. Було виявлено проблеми, які заважають ефективному впровадженню проєктів цифрової трансформації у міжнародних мультимодальних перевезеннях. До недоліків відноситься той факт, що міжнародна транспортна документація для деяких видів транспорту частково електронна, транспортні документи, необхідні для митного контролю при мультимодальних операціях з різними видами транспорту, подаються у паперовому форматі. **Висновки.** Незважаючи на те, що митні декларації є електронними, використання паперових транспортних документів унеможливає повне застосування електронних супровідних документів при митному оформленні. Доведена важливість впровадження проєктів цифровізації у транспортній галузі шляхом організації процесу електронізації транспортних накладних та здійснення їх обміну з електронними інформаційними системами митних органів для об'єднання компетентних транспортних органів та учасників системи доставки вантажів до інтегрованої цифрової системи забезпечення мультимодальних перевезень.

Ключові слова: проєкт цифровізації, мультимодальні перевезення, електронне митне декларування.

Introduction. The development of technological innovations has identified digital transformation as the most important sector of the national economy. Digitalization has become a necessary condition for effective cooperation between countries in the formation of a transport and technological system for the delivery of goods. In recent years, many countries in North and Central Asia have embarked on activities to capitalize on the growing potential of digital transformation and have helped establish strong research and development sectors as digital development hubs in the subregion. Meanwhile, there are still certain gaps in areas such as infrastructure development, digital literacy and technological competitiveness that limit the ability to realize their digital potential [1].

Given the Republic of Azerbaijan's location as an important connectivity crossroads, it plays an essential role as a transport hub for improving regional inter-connectivity and the movement of goods and services. Based on this factor, the Government of Azerbaijan has continued the implementation of a number of improvements concerning cross-border trade facilitation [2].

Formulation of the problem. The use of digitalization mechanisms in various sectors of the economy can be traced within the framework of state policy, as well as private business initiatives in the countries of North and Central Asia. However, the introduction of new technologies has its drawbacks, which relate to the emerging problems of digital literacy, the development of infrastructure projects and ensuring the technological competitiveness of ongoing digitalization projects.

Analysis of recent research and publications. Digital technologies, including artificial intelligence and big data, are general-purpose technologies that have a range of characteristics and are particularly well suited to deliver longer-term productivity gains and economic growth across a wide range of industries" [1; 3]. The combination of technological advances, from advances in digital technologies to the creation of new materials and biotechnologies, opens up new opportunities for socio-economic growth and industrial development. Thanks to researchers and practitioners, the results of the application of new technologies have received names such as Industrialization 4.0, the Next Production Revolution, the Third Wave or Smart Manufacturing. Combined with other global trends such as resource depletion and global warming, technological advances will change the nature of industrial production, with a huge impact on productivity, employment opportunities and the well-being of society. The next production revolution opens up a variety of opportunities for economic development through the optimization of processes and the use of resources, the mass individualization of products and services, the automation of industrial production and human-machine interaction [1; 4].

Unlike the linear model of innovation, when the costs of innovation are gradually transformed into the results of innovation, in the digital economy, various types of innovation develop in parallel to each other and are characterized by continuous improvements due to feedback from consumers. While in traditional sectors of the economy, economic value is created within the enterprise, in the digital economy, value is created outside the enterprise at the time of interaction between partners, shippers and customers [1].

Advanced predictive models and machine learning technologies can predict a failure before it occurs, thereby contributing to significant efficiency and value creation when

failure is prevented. The proliferation of smart and connected devices, as well as the improvement of algorithms, are making a significant difference in how the enterprise operates. Manufacturing enterprises are increasingly engaged in the development of additional digital services that would increase the functionality of their products and create new revenue streams [1; 5; 6]. The mechanisms for implementing digitalization projects for the control system for the delivery of goods in international transportation are considered in [7; 8].

Formulation of the purpose of the article. The purpose of the article is to develop a mechanism for managing digitalization projects of the international system of multimodal transportation, taking into account the concept of sustainable development.

Main material of the research. By research the state of digital technologies, it is possible to identify those industries that are more in need of a transition to digital technologies. These industries include the following: the financial sector; e-commerce; cargo delivery system; agro-industrial complex.

To implement digitalization projects, a clear concept for the development of the digital economy should be developed at the state level, taking into account the introduction of regulatory mechanisms for verifying the effectiveness of proposed solutions related to digital technologies.

These actions involve an increase in spending on research at universities, research institutes, as well as the redistribution of funds for the introduction of new technologies and innovations. The proposed activities will improve communication within government institutions and strengthen cooperation in the development of digital infrastructure.

These efforts to realize the digital potential in North and Central Asia will accelerate the achievement of the Sustainable Development Goals for the adoption of measures aimed at the optimal use of limited resources and the use of environmentally friendly technologies, maintaining stability and ensuring the integrity of functioning systems [9].

As you know, the application of digital transformation mechanisms in relation to international multimodal transportation is of particular importance for ensuring a sustainable economy. The widespread use of digital processes in international transport operations, which have become an integral part of our daily lives and economic activities and are becoming increasingly important during the global pandemic, plays an invaluable role in improving efficiency in this sphere and organizing modern transport procedures. Given the important role of customs and border crossing procedures in the international transport chain, the application of digital mechanisms in the customs system is essential.

It should be noted that the customs system of Azerbaijan uses electronic customs operations and customs declaration, and customs clearance of documents is carried out on the basis of paperless technologies. Since 2016, all customs declarations have been submitted to the customs authorities only in electronic form. In addition, the expansion of the use of electronic systems in customs procedures used in international transport is a priority for the state. Thus, since 2019, a short import declaration has been used to ensure the preliminary electronic declaration of goods imported into the country (Figure 1).

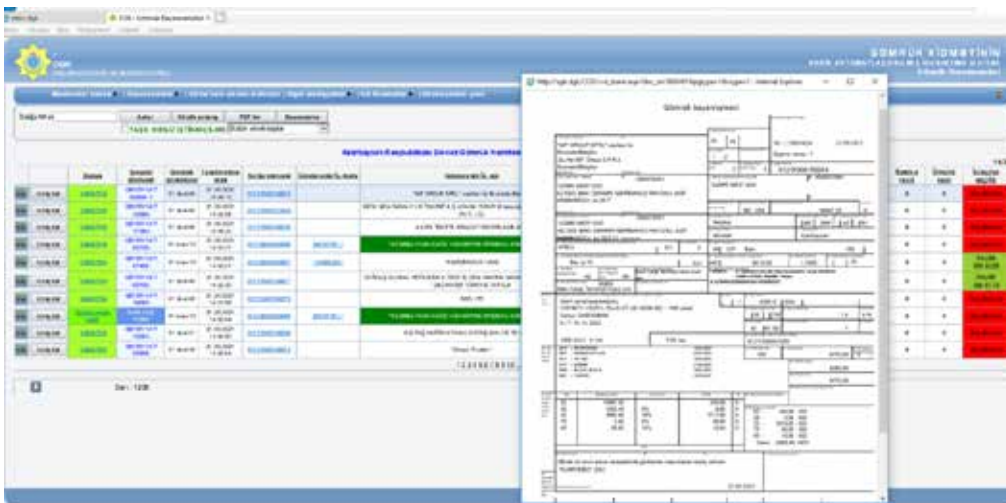


Fig. 1. Electronic declaration system

The electronic declaration system includes: filing a declaration in electronic form with an enhanced electronic signature; use of Internet technologies for the provision of electronic services; the ability to receive and automatically process information in 24/7 format; possibility of integration with other systems; reduction of paperwork.

The measures that contributed to the Republic of Azerbaijan's scores in Paperless Trade Facilitation category (Figure 2, Figure 3) include the Automated Customs System, Electronic Single Window System, electronic submission of Customs declarations, electronic application and issuance of Preferential Certificates of Origin, and e-payment of customs duties and fees – all of which the Republic of Azerbaijan has now changed to “fully implemented” status.

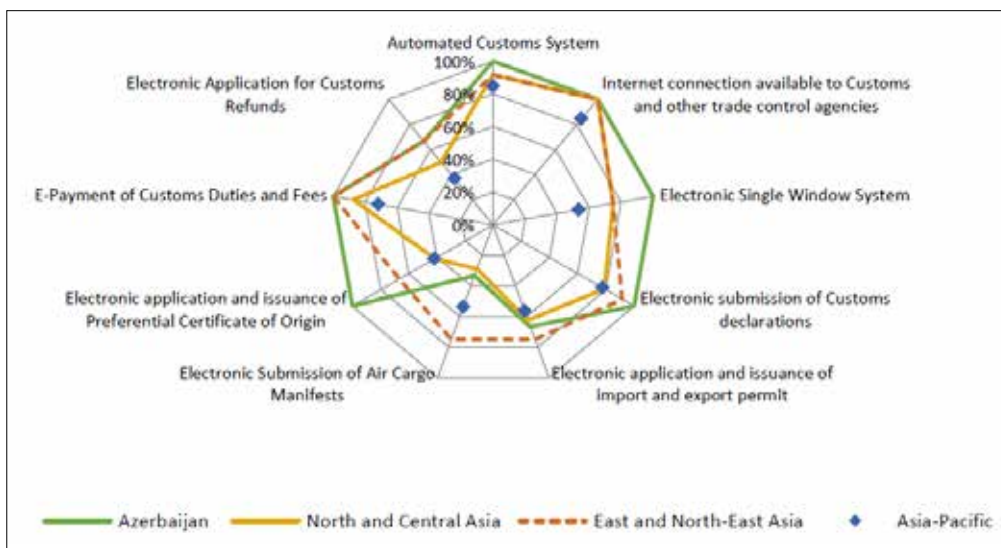


Fig. 2. Azerbaijan implementation of paperless trade measures [10]

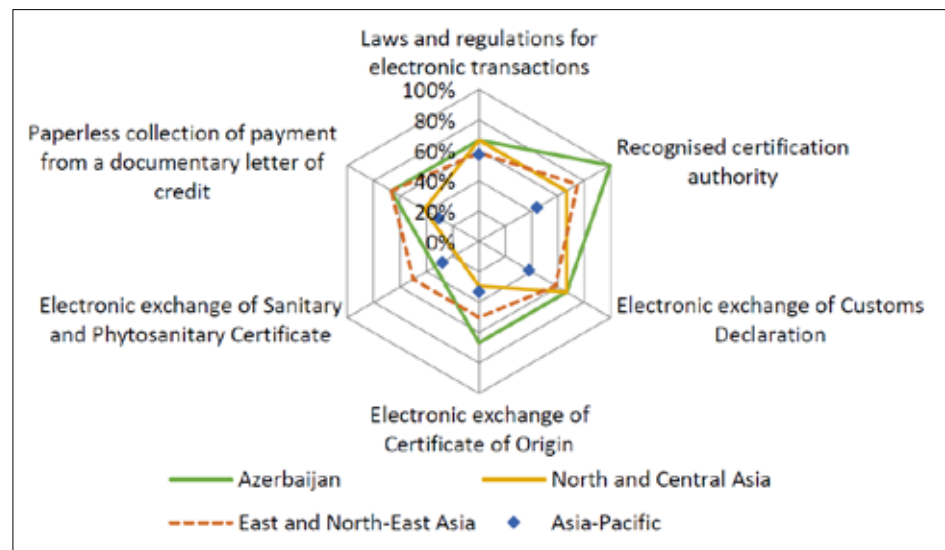


Fig. 3. Azerbaijan implementation of cross-border paperless trade measures [10]

Transformation to a digital economy and the introduction of paperless solutions aimed at facilitating the trade operations are among the priority issues for the Republic of Azerbaijan. In recent years the Government has taken significant steps towards developing the national digital policy that facilitates trade, simplifies non-tariff barriers.

Currently, State Customs Committee is assigned to perform necessary measures to implement the cross-border paperless trade. In this context, it coordinates the Electronic Customs Project (e-Customs), which is one of the components of the “Electronic Azerbaijan” (e-Azerbaijan) initiative. The e-Customs project based on the legal and regulatory documents created within the framework of “e-Azerbaijan”. Therefore, the completion of the e-Customs project is closely related to the implementation of “e-Azerbaijan”. SCC activities mainly comprise the following areas [2]:

- Development of Unified Automated Management System of the State Customs Committee on the basis of modern technologies and ensuring security of the system;
- Enhancement of the corporate Web Portal by increasing the number of customs e-services;
- The further development of the customs Single Window via a new e-Window project by increasing the inter-linkages with other government agencies, permit issuing agencies and the private sector;
- Developing Smart Customs solutions for providing customs services via a single mobile platform;
- Further development and digitalization of the national transit system by further development of the existing systems (TIR), and integration to the New Computerized Transit System of EU and other initiatives.

The Republic of Azerbaijan due to its advantageous geographical position is a transit country, without access to the sea. In this regard, the development of transit potential is one of the main indicators of economic stability. Goods and vehicles transiting through the territory of our country are placed under special customs procedures for internal or international transit in accordance with the Customs Code of the Republic of Azerbaijan.

The volume of transit traffic through Azerbaijan is shown in Table 1.

Table 1

Statistics of transit traffic for 2021 (tons) [11]

Type of transport	Transportation volume, tons
Automobile	1 702 212,18
Railway	3 950 189,23
Maritime	253 879,68
Air	294 228,62
Stationary	3 122 655,53

In general, road and rail transport play an important role in the transit of goods across the country's borders.

The development of transit potential is one of the main indicators of economic stability (Figure 4).

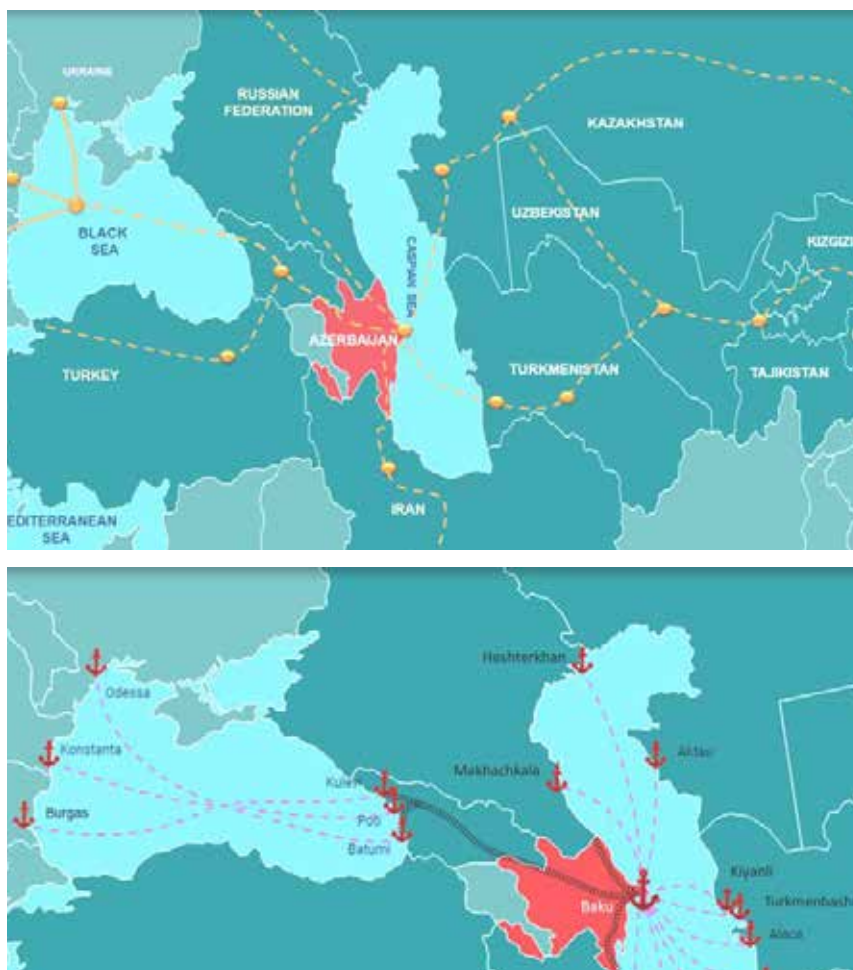


Fig. 4. Transport corridors

Considering the Republic of Azerbaijan's location at the crossroads of the East-West and North-South international transport corridors connecting Europe and Asia, the development of international transport corridors passing through the country is of particular importance. The sustainable development of the transit sector accelerated the integration into the global and economic environment. Plus, the development of transport links which are the main means of integrative processes, have become one of the main priorities of the economic policy of the Republic of the Republic of Azerbaijan.

The North-South Transport Corridor is designed to provide transport links between the Baltic States and India through Iran. International transport corridor "East – West", passing through the Euro-Asian continent, the advantages of this transport corridor are the stimulation of trade between the EU and Asia. The Baku-Tbilisi-Kars (BTK) railway – implemented with special efforts by Azerbaijan, Turkey and Georgia, connected the Trans-Europe-Asia railway networks. Transport Corridor Europe-Caucasus-Asia (TRACEKA) ensured the development of a transport corridor from Europe to the countries of Central Asia through the Black Sea, the Caucasus and the Caspian Sea.

The geographical location of the country on the TRACECA, North-South, CAREC, Lapis Lazuli transport corridors creates favorable conditions for the development of the country's transit potential. By joining these corridors, the country has ensured the flow of goods in different directions.

In 2019, the TIR Electronic Pre-Declaration System (TIR EPD) was introduced. Electronic pre-declaration mechanisms enable faster border crossings in international traffic through the use of risk-based customs control methods. It allows transport operators to send advance information on goods transported under the TIR procedure to customs authorities in every country along the TIR journey in one go.

Moreover, a pilot eTIR project on international transport under the TIR Convention has been implemented, and the technical harmonization of the customs system with the newly established eTIR international system, supported by the UN Economic Commission is progressing well. In the future, as the number of countries willing to implement the eTIR procedure increases, it will be possible to create a multimodal eTIR corridor through the territory of Azerbaijan.

The use of alternative digital transit systems that promote the development of international trade is one of the priority issues in the implementation of projects for the digitalization of international multimodal transportation. Thus, within the framework of the Central Asian Regional Economic Cooperation (CAREC) program, work was done on the Advanced Transit System (CATS) project between Azerbaijan, Georgia and Kazakhstan, and a draft agreement and software specifications were prepared.

In addition, the European Union-supported Twinning project to join the European New Computerized Transit System (NCTS) provides for significant reforms in legislation, electronicization and procedures in order to coordinate the country's transit system with this system.

The customs Single Window system is an integral part of the customs Unified Automated Management System (UAMS), under which all data exchanges are carried out nationally and with foreign partners. UAMS is a nationwide system that is operational at all ports and for all methods of transportation and Single Window functions such as

the national Single Window, which acts as the national single point of connectivity for the private sector for any cross-border operations.

UAMS is the central point through which the required import-export and transit declarations are processed electronically. Shipment data are processed immediately, and errors are detected and corrected at the time of filing. SCC is also working on the establishment of data exchange with Kazakhstan and several other countries was designed to ensure compliance with legislation and enforcement activities, improve trade statistics, eliminate duplicate actions in-border operations, improve customer service etc [2].

Customs are working on further extension of the customs Single Window and will launch a new Electronic Window (e-Window) project by increasing the inter-linkages with other Government Agencies and Permit Issuing Agencies and the private sector; the customs “e-Window” system will be a single electronic entry point between entrepreneurs and government agencies and will allow all trade operations to be carried out in an electronic environment that will minimize time and cost. The Electronic Window (e-window) system will concentrate all trade chain operations and will ensure fast track, customs clearance, pre-arrival data transmission, real-time issuance of permits and other documents, online payment processing etc. The State Customs Committee intends to create a single web application and bring together the responsibilities and functions of each relevant state agency involved in foreign trade operations. This will create opportunities to respond immediately to inquiries addressed by the system to them, and effective coordination environment between state bodies.

Conclusions. During the study, it was found that the full digitalization of efficient, safe and fast multimodal transportation requires, first of all, the use of electronic technologies and electronic documents by all parties involved in the transportation process.

Problems that hinder the effective implementation of digital transformation projects in international multimodal transportation were identified. Such shortcomings include the fact that international transport documentation for some modes of transport is partially electronic, transport documents required for customs control in multimodal operations with various modes of transport are submitted in paper format. Despite the fact that customs declarations are electronic, the use of paper transport documents makes it impossible to fully use electronic accompanying documents in customs clearance. Given the above information, it can be concluded that it is important to introduce digitalization projects in the transport industry by organizing the process of electronicization of waybills and exchanging them with electronic information systems of the customs authorities to unite the competent transport authorities and participants in the cargo delivery system into an integrated digital system for providing multimodal transportation.

REFERENCES

1. The working document of the subregional branch for North and Central Asia “Implementation of digital potential in North and Central Asia”. [Electronic resource]. URL: <https://unece.org>.
2. Readiness Assessment for Cross-Border Paperless Trade: Azerbaijan (2022). United Nations Publications, Trade and Investment Division, ESCAP, Bangkok, Thailand, 12–28.

3. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2010). *The Impacts of Nanotechnology on Companies: Policy Insights from Case Studies*. Paris. [Electronic resource]. URL: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264094635-en>.
4. Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of industrial information integration*, vol. 6, pp. 1–10. doi: 10.1016/j.jii.2017.04.005 [Electronic resource]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452414X17300043>.
5. Roy, R., Shehab, E., & Tiwari, A. (2009). Product-service systems. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 20(5). <https://doi.org/10.1108/jmtm.2009.06820eaa.001>.
6. Holmström, J. and Partanen, J. (2014), “Digital manufacturing-driven transformations of service supply chains for complex products”, *Supply Chain Management*, Vol. 19 No. 4, pp. 421–430. DOI: <https://doi.org/10.1108/SCM-10-2013-0387>.
7. Piterskaya, V.M. (2013). Transportation system development modeling subject to customs control of cargo flows. *Constanta Maritime University Annals*, Vol. 20, 311–315.
8. Пітерська, В. (2020). Механізми здійснення митних формальностей в міжнародній транспортній системі. *Вісник Одеського національного морського університету*, (60), 132–139. DOI: <https://doi.org/10.33082/2226-1893-2019-3-132-139>.
9. GPM Global P5 Standard for Sustainability in Project Management V. 1.5.1. [Electronic resource]. URL: <https://www.greenprojectmanagement.org/>
10. UN Global Survey on Digital and Sustainable Trade Facilitation, 2021. [Electronic resource]. URL: <https://www.unescap.org/our-work/trade-investment-innovation/untf-survey>.
11. The official website of the State Customs Committee of the Republic of Azerbaijan [Electronic resource]. URL: <https://customs.gov.az/en/faydali/gomruk-statistikasi/xarici-ticaretin-veziyyeti-haqqinda>.

**ESTABLISHMENT OF RISK-ORIENTED API/PNR PROGRAMME
MODEL FOR EFFECTIVE PASSENGER CONTROL
ON INTERNATIONAL FLIGHTS**

Jeyhun Najafli¹, Cetin Elmas²

¹ Lecturer, Head of Trade Facilitation Department of the State Customs Committee of the Republic of Azerbaijan

Azerbaijan State University of Economics, Baku, Azerbaijan

²Dr., Professor of the Department of Electrical and Electronic Engineering

Gazi University, Ankara, Turkey

ORCID ID: 0000-0001-9472-2327

Summary

Introduction. Continuous growth in the number of passengers on international flights increases customs authorities and other relevant agencies need to be prepared to handle the number of passenger without harming the speed of the passengers flow through the air border checkpoints. Responding to this increase, the use of modern technology and greater domestic and international cooperation can enhance the effectiveness of customs control and assist customs to more efficiently cope in preventing the cross-border movement of terrorists, threats arising out of the terrorist activity, prevent dangers to national security. Incorporating passenger selection/screening criteria based on high-quality risk indicators and advanced passenger information has proven to have a positive effect on enforcement activities. **Purpose.** The purpose of the research is to develop risk-oriented Advance Passenger Information and Passenger Name Record (API/PNR) programme model for effective passenger control. **Results.** It was found that successful establishment and utilization of proposed risk-based conceptual model of Advance Passenger Information (API) and/or Passenger Name Record (PNR) in Azerbaijan offer the following benefits for the involved parties: simplification and facilitation of existing procedures; reduction or elimination of unnecessary passenger control measure; access to the risks, fulfil targeted controls and provide pre-clearance of the flights; establishment of a risk-based model for Border Control Management; improvement and determination of the ways to overcome the challenges faced in matters related to identification and risk management systems; increase of awareness of the interested government bodies with the further possibilities more effectively address potential threats targeting national security. **Conclusions.** Advance Passenger Information and Passenger Name Record data play an important role in identifying the risks because it allows customs authorities to carry out targeted and risk-based control, which helps to detect and prevent a number of serious transnational offenses while maintaining data protection and privacy.

Key words: risk management, customs service, advance passenger information, passenger name record.

**СТВОРЕННЯ РИЗИК-ОРІЄНТОВАНОЇ МОДЕЛІ ПРОГРАМИ API/PNR
ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО КОНТРОЛЮ ПАСАЖИРІВ
НА МІЖНАРОДНИХ РЕЙСАХ**

Джейхун Наджафли¹, Четін Елмас²

¹ викладач, начальник Відділу сприяння торгівлі Державного митного комітету
Азербайджанської Республіки

Азербайджанський державний економічний університет, Баку, Азербайджан

² д.т.н., професор кафедри електротехніки та електронної інженерії

Університет Газі, Анкара, Туреччина

ORCID ID: 0000-0001-9472-2327

Анотація

Вступ. Постійне зростання кількості пасажирів на міжнародних рейсах збільшує навантаження на митні органи та інші відповідні органи, які повинні бути готові обробляти всю кількість пасажирів без шкоди для швидкості пасажиропотоку через повітряні пункти пропуску. У відповідь на це зростання використання сучасних технологій і розширення внутрішнього та міжнародного співробітництва може підвищити ефективність митного контролю та допомогти митницям ефективніше боротися із запобіганням транскордонному переміщенню терористів, загрозам, що виникають внаслідок терористичної діяльності, запобігання контрабанді, торгівлі наркотиками та іншим загрозам національній безпеці. Доведено, що включення критеріїв відбору/перевірки пасажирів на основі високоякісних індикаторів ризику та розширеної інформації про пасажирів позитивно впливає на діяльність по ефективному контролю за переміщенням осіб через кордон. **Мета.** Розробка ризик-орієнтованої моделі програми попередньої інформації та запису даних про пасажирів (API/PNR) для ефективного контролю. **Результати дослідження.** Було встановлено, що успішне впровадження та використання запропонованої концептуальної моделі попередньої інформації про пасажирів (API) та/або запису даних про пасажирів (PNR) в Азербайджані має наступні переваги для залучених сторін: спрощення і полегшення існуючих процедур контролю та оформлення; зменшення або скасування непотрібних заходів контролю пасажирів; доступ до ризиків, здійснення цільового контролю та надання попереднього дозволу на рейси; створення моделі управління прикордонним контролем на основі оцінки ризиків; вдосконалення та визначення шляхів подолання викликів, що виникають у питаннях, пов'язаних із системами ідентифікації та управління ризиками. **Висновки.** Попередня інформація про пасажирів та запис даних про пасажирів відіграють важливу роль у визначенні ризиків та дозволяють митним органам здійснювати цілеспрямований контроль, що ґрунтується на оцінці ризику, що допомагає виявити та запобігти низці серйозних транснаціональних правопорушень, зберігаючи захист даних і конфіденційність.

Ключові слова: управління ризиками, митне обслуговування, попереднє інформування пасажирів, запис даних про пасажирів.

Introduction. Azerbaijan Customs Service (ACS) is developing dynamically and moves ahead confidently as an organization aiming continuously implement international standards to achieve world-class quality of services. Azerbaijan Customs

Service pays special attention to the application of IT systems and technologies which facilitates the movement of the goods, passengers and means of the transport and simplifies the border crossing procedures.

According to statistics [1] number of passengers boarded by the global airline industry has reached ported 4.7 billion passengers globally in 2020. It is estimated that the global volume of air passengers grows at a rate between 5% and 7% every year and could reach 7.2 billion by 2036.

The traditional Customs inspections based mostly on selective methods of Customs control, behavioural analysis, questioning, baggage surveillance and etc. is no longer sufficient to control increasing risks and threats. Simultaneously Customs authorities around the globe, face major challenges in balancing a country's need for controls with the benefits of facilitating cross-border traffic of people and their goods. One of the most challenging tasks for an Administration is the mitigation of the risks associated with the movement of people across its borders. In most cases administration has only a short time to make a decision whether the person is a high or low risk while managing high volume of travellers. The task is further complicated by the large number of means of transportation that are used, including commercial aviation, general aviation, commercial vessels, cruise ships, trucks, automobiles, train, and on foot.

Problem setting. Investing in risk management solutions based on advance information as the guiding principle for border management can provide assistance to better manage the growing volume of travellers flows through the "air" borders. The solution, which can provide customs with information about passengers in advance would enable customs to perform risk-based targeted controls on passengers and the goods carried by them while enabling the flights to be processed more effectively. The ability of border control agencies to identify persons of concern in advance of their arrival or departure is considered significant in supporting a government's commitment to ensuring the safety and security of its citizens.

The introduction of risk management techniques within Customs often comes as a result of the acknowledgment that due to an increasing cross-border flows and changing government priorities, the administration is unable to continue to deliver its customs control operations in the same manner as previously. Therefore, this generally means that administrations recognize that they can no longer interact physically with 100% of cross-border flows and need to move from traditional style controls towards a risk-based operating model by a reassessment of its mission, roles, and methods of operation. To address this challenge most administrations, implement risk-based selectivity and targeting.

The use of Advance Passenger Information (API) and/or Passenger Name Record (PNR) for risk assessment would greatly assist Azerbaijan Customs to meet the needs of enforcement and facilitation of legitimate travel and would be the starting point for the further development and exploitation of intelligence for controlling the travellers [2; 3].

Analysis of literature data. Over time, ACS has aligned its passenger control procedures with the best international practices in terms of duty-free baggage allowances and simplified procedures supported by modern infrastructure and other facilities. Aiming and adopting modernization, ACS has become more transparent in its activity in

terms of simplification of Customs procedures, recent reformation of customs legislative framework and continuous trade facilitation measures and the introduction of concepts recognized as international standards in the field of customs. ACS has taken steps to offer measures such as electronic data exchange, e-declaration, risk management, pre-arrival data exchange on goods, Single Window principle, etc. Many of these measures have been introduced to the public as e-services available through the customs and state e-services web portals. A significant part of the measures undertaken was devoted to enhance facilitation and simplification of Customs formalities in border crossing [4].

Currently, many border control agencies all over the world prefer more selective approach for passenger control which is based on intelligence data analysis, behavioural patterns, risk management, and other efficient methods of targeting, also combining these approaches with the traditional random selection methods. It is widely recognized that using such methods produces better results than routine systematic inspections [5].

Currently, ACS performs the border checks on passengers on the basis of the following techniques and methods: behavioural analysis, documents control and past experience when selecting passengers for further checks; the use of non-intrusive technical means of customs control such as X-ray equipment for baggage examinations; dual-channel system (Red and Green Channels) for speedy clearance of inbound baggage; basic pre-arrival screening of the “air passengers” based on the paper lists of passengers provided by some airlines in advance for certain flights (departure and arrival time of transport, the total number of passengers with an indication of names carried on that transport and initial point of embarkation); simplified e-declarations for passengers (declarations can be submitted electronically in advance by filling the web-based declaration form before arrival to Azerbaijan or by using the special electronic kiosks installed in the airports) [6].

The purpose of the research. The main goal of this article based on the experience of Azerbaijan customs service to provide guidance and support to the interested Customs Authorities to successfully implement their national API/PNR Programme in order to facilitate border control and clearance of passengers and their baggage using air transport, prevent smuggling and entrance of potentially high-risk goods and individuals into the country.

Materials and Methods of the Research. Continuous growth in the number of passengers on international flights increases customs authorities and other relevant agencies need to be prepared to handle the number of passenger without harming the speed of the passengers flow through the “air” border checkpoints. Responding to this increase, the use of modern technology and greater domestic and international cooperation can enhance the effectiveness of customs control and assist customs to more efficiently cope in preventing the cross-border movement of terrorists, threats arising out of the terrorist activity, prevent smuggling, drug trafficking and other dangers to national security. Incorporating passenger selection/screening criteria based on high-quality risk indicators and advanced passenger information has proven to have a positive effect on enforcement activities.

While the decisions taken by customs officers are based on their experience, expertise, and information at hand, it is difficult and mostly impossible to assess all the risks without all the information that could have been obtained through the pre-arrival data

on passengers. In addition, these procedures, particularly during the crowded touristic seasons, are often judged by the travellers as measures affecting their dignity (for example, while waiting for primary or secondary checks, while being held in holding rooms or short-term holding facilities, upon the refusal of entry or during searches). If the situation is not explained well to the passengers, routine checks based on unreasonable impressions of the customs officers may lead to perceived discrimination and other implications. In this regard, passenger targeting and risk management tools with the use of the Advance Passenger Information (API) and Passenger Name Record (PNR) datasets could be beneficial to Customs authorities to switch from the routine checks to a passenger selection/screening criterias based on high-quality risk indicators and analysis of pre-arrival information [7; 8].

The need for customs to enhance controls, related with the growth of air passenger traffic has started to place strain on the resources of ACS, resulting in possible delays in the processing of passengers arriving at airports. Taking this fact into account there is a growing need to find a solution that would assist customs to handle increasing workloads.

This demand of customs could be solved with investing in a solution that would tailor customs processes while adhering to international standards. Providing the ACS with passenger information in advance of a flight arriving in Azerbaijan will facilitate checks against watchlists to identify persons of interest before passengers arrive at border control. This will be to the benefit of both the State and genuine passengers by:

- Assisting in the prevention of crime;
- Facilitating the smooth passage of legitimate travelers;
- Allowing for improved and more effective management of the State's borders.

In order to accurately balance between facilitating cross-border movements and upholding border security, effective cooperation between government bodies, the transport sector and relevant international actors is essential. At the moment API and PNR are two technical solutions to streamline traveller identification management and facilitate border management.

The importance of a legislative framework for API/PNR data transfer is stipulated in Revised Kyoto Convention [9].

API involves the capture of a passenger's biographic data and other flight details by the transport operator before departure and the transmission of the details by electronic means to the Border Control Agencies in the destination country and made available on the primary line at the border crossing point. API enables national border agencies and other government departments to pre-identify persons of interest prior to their arrival (Table 1).

PNR data (Table 2) are unverified information provided by passengers and collected by air carriers to enable the reservation and check-in processes. It includes information on travel itinerary, ticket information, contact details, means of payment and others. PNR differs from API comprising a greater number of data sets. The analysis of PNR data can provide the authorities with important elements from a criminal intelligence point of view, allowing them to detect suspicious travel patterns and identify forms of serious crime, associated criminals and terrorists, in particular those previously unknown to law enforcement [10].

Table 1

Advance Passenger Information (API) Data Items

№	Data Item	Definition
1	Travel Document Type	Type of Travel Document being used.
2	Travel Document Number	Identification Number of the Travel Document
3	Travel Document Expiry Date	Expiry date of the Travel Document. Mandatory only if the travel document has one.
4	Travel Document Issuing State	State/Organization that issued the Travel Document being used
5	Surname	Surname (family name) of the travelling person
6	Given Names	Given names of the travelling person.
7	Gender	Gender of the travelling person
8	Date of Birth	Date of birth of the travelling person
9	Nationality	Nationality of the travelling person
10	PNR locator code	A code which uniquely identifies a particular PNR record for a given voyage. This code is used to link a passenger's API data to a single PNR record. The same PNR record locator code needs to be included in both the API and PNR. It is anticipated that Carriers use the booking reference or PNR to populate this data element.
11	Carrier Operator Unique Passenger Reference Identifier	Used to uniquely identify a passenger within a Carrier's Reservation and Departure Control System's (DCS). Therefore there is no repeat between flights.
12	Initial Point of Embarkation	Port code of the initial place of embarkation
13	Final Point of Debarkation	Port code of the final place of debarkation
14	Transit Flag	Indicates if the passenger or crew is in transit
15	Total Luggage Weight	Weight of total luggage carried by a passenger
16	No of Bags	Total number of bags carried by a passenger
17	Bag Tags	Tag information of bags carried by a passenger
18	Security Number	Unique number allocated by the check-in desks and it identifies a passenger.
19	Baggage Details	Details of the baggage including bag destination
20	Seat number	Passenger seat number

Table 2

Passenger Name Record (PNR) Data Items

№	Data Item	Definition
1	2	3
1	Passenger Name Record (PNR) locator code	A code which uniquely identifies a particular PNR record for a given voyage. This code is used to link a passenger's API data to a single PNR record.
2	Date of reservation / issue of ticket	Date reservation made.
3	Date(s) of intended travel	Date Passenger intends to travel.
4	Name(s) on the PNR	Passenger name.
5	Available frequent-flyer information (free tickets, upgrades, etc)	Card number and type of any frequent flyer or similar scheme used.
6	Other names on PNR, including numbers of travellers on the PNR	Including names of all other passengers on the booking and any contact person.

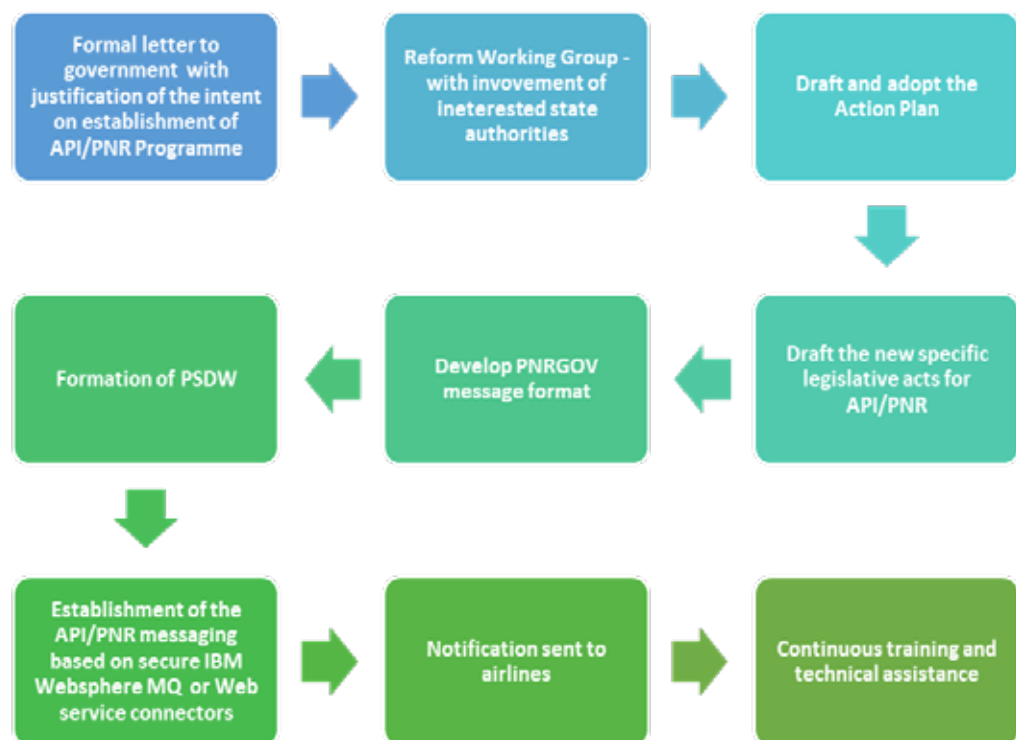
Table 2 (ending)

1	2	3
7	All available contact information (including originator information)	Passenger's address and any further contact address for the passenger/reservation. Can include telephone number for Passenger, Travel Agency, Hotel etc. Email address of person who made reservation.
8	All forms of payment information and billing information	Specifies payment means and details (e.g. Credit Card Number).
9	Travel itinerary for specific PNR	PNR flight itinerary segments/ports, itinerary history, origin city/board point, destination city, active itinerary segments, canceled segments, layover days, flown segments, flight information, flight departure date, board point, arrival port, open segments, alternate routing unknown (ARNK) segments, non-air segments, inbound flight connection details, on-carriage information, confirmation status
10	Travel agency and Travel agent	Travel agency details, name, address, contact details, IATA code
11	Code share PNR information	PNR reference of code share booking.
12	Split / Divided PNR information	The fact that a reservation in respect of more than one passenger has been divided due to a change in itinerary for one or more but not all of the passengers.
13	Travel status of passenger (including confirmations and check-in status)	Travel status of passenger, including confirmations, check-in status, no show or go show information
14	Ticketing information including Ticket number, one-way tickets, and Automated Ticket fare quotes	Includes ticket number and ticket type.
15	All baggage information	Number of bags, total weight, tag numbers, destination of bags and pooled bag details.
16	Seat information include seat number	Class of travel, seat number and cabin number request where applicable.
17	General remarks including other supplementary information (OSI) and Special Service Information	Other supplementary information, e.g. Infant, Staff, VIP. Special Service Information or Special Service Requests.
18	Any collected Advance Passenger Information (API)	Any API data elements collected at the time of booking. Name and travel document number will be extracted.
19	All historical changes to the PNR listed in data types 1 to 18 above	All changes to the PNR record.

The scope of API and PNR data refers to data about travellers collected prior to departure or at the time that flight bookings are made. The API/PNR data comprises personal, financial information (travellers identifying details, method of payment and bank details, contact details, routing and etc.) about travellers which requires

adequate protection against misuse. Reviewing the work done so far in the described area, in order to create efficiently working system the following approaches could be implemented (Figure 1).

API/PNR data are key sources of information in order to carry out and rationalize customs controls on passenger's traffic in a more effective way. By using PNR data in real time, pro-actively and re-actively customs authorities can assess risks and better combat serious transnational crime and terrorism threats.



*Fig. 1. Conceptual model of API/PNR system
(PSDW – Passenger Data Single Window)*

In order to perform their tasks as efficient as possible, ACS, for example, is recommended to use a combination of traditional techniques of customs control such as behaviour analysis and questioning with the modern non-intrusive control technique through the use of API/PNR data processing.

Pre-arrival risk assessment is applied at three levels: selection of flights for risk assessment coverage; profiles and criteria searches that run over a selected flight to identify passengers for further analysis; and analysis of passenger information and intelligence which may highlight a passenger as a person of interest (including national watchlists).

Flight and passenger selection decisions should be based on risk indicators and profiles which are developed by using historical data. The procedure allows travellers information to be processed against other information available in the national databases

including intelligence information from the law-enforcement and other government agencies. The end result is an improved process or system that assists border agencies in identifying individuals who require additional inspection and making informed decision on the admissibility of individuals seeking admission into the country. With respect to the Azerbaijan Customs Service, the properly deployed API/PNR risk analysis system will enhance the performance of Azerbaijan customs in combating the trafficking of drugs, weapons, counterfeits and cultural goods (for example to be able to measure the frequency of goods conveyed by passengers, by combining the data with the national passenger declaration database). As the information on passengers will be available prior to a flight, it will be possible to ensure large-scale and very rapid identification of sensitive or illogical routes, inconsistencies of unduly short duration of stay with weight/size of a passenger's luggage, unusual forms of payment, past criminal patterns etc., or a combination of these criteria.

API and PNR data play an important role in identifying the risks associated with the baggage of passengers because it allows customs authorities to carry out targeted and risk-based control, which helps to detect and prevent a number of serious transnational offenses and organized crime while maintaining data protection and privacy. Specifically, for Azerbaijan, targeted controls based on API/PNR analysis can support customs in combatting with the illegal outbound movement of the currency, cultural heritage and goods prohibited and restricted for importation. The use of API/PNR data, which enables identification of passenger based on their risk profiles.

Conclusions. Pursuing a global approach with regard to the transfer and use of API/PNR data, this article brings together approaches and recommendations how to implement the national API/PNR Programme on the example of Azerbaijan.

Border control arrangements in Azerbaijan concerning travellers seek to maximise the economic, societal and political benefits of travel while at the same time identifying and mitigating risks and threats. To achieve these national objectives, Azerbaijan must identify travellers and assess traveller risks.

The benefits of API and PNR transmission will enable border control authorities of Azerbaijan to identify potentially high-risk individuals, prevent smuggling and process passengers in a rapid and efficient manner.

The development of modern and effective passenger targeting and risk management tools on the basis of API and PNR datasets is a clear example of effective use of human resources in customs. The solution increases the effectiveness of the checks with the usage of the same personnel.

Establishment of the system will also benefit the inter-agency cooperation, as the technology requires collaboration and interconnection of the databases with the State Border Service, Police, other governmental agencies, and airlines.

REFERENCES

1. Number of scheduled passengers boarded by the global airline industry from 2004 to 2022 (in millions). URL: <https://www.statista.com/statistics/564717/airline-industry-passenger-traffic-globally>.
2. Guidelines on API. URL: http://www.wcoomd.org/~media/wco/public/global/pdf/topics/facilitation/instruments-and-tools/tools/api-guidelines-and-pnr-doc/apiguidelines_eng.pdf?db=web

3. Passenger Name Record (PNR) Guidelines. URL: https://www.iata.org/iata/passenger-data-toolkit/assets/doc_library/04-pnr/New%20Doc%209944%201st%20Edition%20PNR.pdf.
4. Customs Code of the Republic of Azerbaijan. URL: https://continent-online.com/Document/?doc_id=31145374.
5. Decree Cabinet of Ministers of the Republic of Azerbaijan № 263, 22.07.2014 “On declaration of commodities and transportation means passed through the customs border” – Article 17. URL: <http://www.e-qanun.az/framework/28199>.
6. The official website of the State Customs Committee of the Republic of Azerbaijan. URL: <https://customs.gov.az>.
7. Message Implementation Guides on API and PNR. URL: <http://www.wcoomd.org/en/topics/facilitation/instrument-and-tools/tools/api-pnr.aspx>.
8. WCO Recommendation concerning the use of API and PNR. URL: http://www.wcoomd.org/-/media/wco/public/global/pdf/about-us/legal-instruments/recommendations/facilitation/rec_2012_api_pnr_en.pdf?la=en.
9. Revised Kyoto Convention. URL: http://www.wcoomd.org/en/topics/facilitation/instrument-and-tools/conventions/pf_revised_kyoto_conv/kyoto_new/spanj.aspx.
10. Council of the European Union. Common non-paper on the value of PNR for Customs law enforcement and risk management in light of the new PNR Directive. URL: <http://www.statewatch.org/news/2017/mar/eu-council-dutch-customs-pnr-paper-14785-16-rev3.pdf>.

**TWO-PHASE MULTI-NOMENCLATURE PRODUCTION/STORAGE
MODEL WITH RANDOM INPUT**

M.Ya. Postan¹, S.N. Dashkovskiy², I.M. Moskvichenko³

¹DSc, Head of the Department Management and Marketing,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-4891-3063

²DSc, Professor, Institute of Mathematics,
University of Wurzburg, Wurzburg, Germany,
ORCID ID: 0000-0001-7049-012X

³PhD, Associate Professor at the Department of Management and Marketing,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine

Summary

Introduction. Recently, much attention in applications of stochastic models to real production/transportation systems modeling and control have been paid. It is explained by necessity to take into account the uncertainty and risks when projecting/operating such kind of systems. **Purpose.** To formulate and solve the problem of optimal values of products removal rates finding. **Results.** The mathematical model of a manufacturing system with several kinds of final product and one kind of raw materials is under consideration. This production system is interpreted as two-phase storage system with random input flow of raw materials which is described by Levy process with nondecreasing sample paths and zero drift. The first phase consists of one warehouse for raw materials storage and second one consists of industrial equipment and several parallel warehouses for final products storage. The production rates and rates of products removal from warehouses are constant. **Conclusions.** The joint distribution of storage levels of raw materials and any kind of final product at warehouses is found in closed form (in the terms of Laplace-Stieltjes transform). The problem of optimal values of products removal rates finding is formulated and solved.

Key words: Two-phase manufacturing system, random input, Levy process, probabilistic distribution.

**МОДЕЛЬ ДВОХФАЗОВОЇ БАГАТОНОМЕНКЛАТУРНОЇ
ВИРОБНИЧО-СКЛАДСЬКОЇ СИСТЕМИ ІЗ ВИПАДКОВИМ ВХОДОМ**

М.Я. Постан¹, С.М. Дашковський², І.М. Москвіченко³

¹д.е.н., завідувач кафедри “Менеджмент і маркетинг”,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-4891-3063

²д.ф.-м.н., професор, Інститут математики,
Вюрцбурзький університет, Вюрцбург, Німеччина,
ORCID ID: 0000-0001-7049-012X

³к.е.н., доцент кафедри “Менеджмент і маркетинг”,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація

Вступ. Останні роки велика увага приділяється застосуванню стохастичних моделей для моделювання виробничо-транспортних систем та оптимального управління ними. Це викликано необхідністю враховувати фактори невизначеності та ризику в процесі проектування таких систем та управління ними. **Мета.** Постановка та рішення проблеми визначення оптимальних значень інтенсивностей вивезення зі складу готової продукції. **Результати.** Розроблена математична модель виробничої системи з декількома видами готової продукції та одним видом сировини. Виробнича система інтерпретується як двофазова система збереження запасів з випадковим вхідним потоком сировини одного виду, який описується процесом Леві з неспадними траєкторіями та нульовим знесенням. Перша фаза включає склад для збереження сировини, а друга фаза включає виробниче обладнання та декілька паралельних складів для збереження готової продукції. Інтенсивності виробництва готової продукції, а також вивезення готової продукції зі складів, вважаються заданими та постійними. **Висновки.** Знайдено в аналітичному вигляді (у термінах перетворення Лапласу-Стильтьєса) сумісний розподіл рівнів запасів сировини та готової продукції. Сформульована та вирішена проблема знаходження оптимальних значень інтенсивностей вивезення готової продукції зі складів.

Ключові слова: двофазна виробнича система, випадковий вхід, процес Леві, імовірнісний розподіл.

1. Introduction

It is well-known that application of the Markov processes for modeling of different types of production/storage systems is motivated by necessity to take into account the following main factors of internal and external uncertainty:

- a) random moments of the orders' giving from market to an enterprise for a product manufacturing;
- b) irregularity of raw materials delivery to enterprise by transport;
- c) restricted reliability of industrial equipment.

During the last 2-3 decades the much researches devoted to development and analysis of Markovian models of production/storage systems were fulfilled [1-6]. But it is almost impossible very often to study the real large-scale systems or networks by the analytical means because of dimension barrier. Therefore, it is expediently to develop the theoretical approaches which allow us to find out the conditions of full or partial decomposition of corresponding mathematical models. Typical example of such kind is the queueing networks theory [1; 2].

In our works [7–10] an approach was proposed for modeling the large-scale stochastic systems which is based on development of continuous variant of queueing networks theory – so-called stochastic storage networks theory. Generally speaking, this approach is a generalization of some classical stochastic storage models for the case of set of interacting single storehouses.

In this paper, the application of this analytic approach is demonstrated for modeling the two-phase production/storage system with several kinds of final product and random input of raw materials.

2. Description of mathematical model

Consider the following two-phase manufacturing system. The first phase consists of one warehouse for raw material storage. From this warehouse, if it isn't empty, the raw materials come to M machines (industrial equipment), located in parallel, for manufacturing corresponding final products. At the m -th machine the raw materials come with the rate W_m and with the same rate the m -th machine manufactures the final product of m -th kind. Correspondingly, the m -th final product comes to the warehouse (of second phase) with the rate W_m and with the rate $U_m < W_m$ it removes off (i.e. comes to consumers) if this warehouse isn't empty. The value U_m may be interpreted as the rate of m -th final product delivery to consumers. Once the storage level of raw materials at warehouse has been exhausted, then all machines have been stopped. It is assumed also that all warehouses have the unlimited capacities. This assumption, of course, is only simplification of reality but, from the mathematical point of view, analysis of a storage model with finite warehouses' capacities may be provided on the basis of this more simple case [10].

The input flow of raw materials is Levy process $X(t)$ [3] with nonnegative trajectories and zero drift, $X(0) = 0$. In our case $X(t)$ has the meaning of total input of raw materials during the time interval $(0, t]$. As it is known [3]

$$\mathbb{E}e^{-sX(t)} = e^{-\phi(s)t}, \operatorname{Re} s \geq 0, \quad (1)$$

where $\phi(s)$ is the cumulant of $X(t)$. For example, for compound Poisson process

$$\phi(s) = \lambda(1 - \beta(s)),$$

where λ is the rate of the Poisson stream; $\beta(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dB(x)$, $B(x)$ is the distribution

function (d.f.) of jump sizes which is concentrated on $R_+ = [0, \infty)$. In this case process $X(t)$ may be interpreted in the following "logistical" way: through the exponentially distributed with mean $1/\lambda$ time intervals an enterprise receives an order from market for manufacturing a random quantities of final products. These quantities demand a batch of raw materials of random size with d.f. $B(x)$.

We denote by $\xi_1(t)$ the content of warehouse for raw materials storage at moment t and by $\xi_{2m}(t)$ the amount of the m -th final product at warehouse at moment t . Let $\xi_1(0), \xi_{1m}(0), m = 1, 2, \dots, M$, are the non negative values.

According to the above assumptions the processes $\xi_1(t), \xi_{11}(t), \dots, \xi_{1M}(t)$ satisfy the following system of integral equations (with probability 1):

$$\xi_1(t) = \xi_1(0) + X(t) - W(t - I_1(t)), \quad (2)$$

$$\xi_{2m}(t) = \xi_{2m}(0) + W_m(t - I_1(t)) - U_m(t - I_{2m}(t)), \quad m = \overline{1, M}, \quad (3)$$

where

$$I_1(t) = \int_0^t u(\xi(\tau)) d\tau, I_{2m}(t) = \int_0^t u(\xi_1(\tau)) u(\xi_{2m}(\tau)) d\tau, m = \overline{1, M};$$

$$u(z) = 0, \text{ if } z > 0, u(0) = 1; W = \sum_{m=1}^M W_m.$$

Note that $I_1(t), I_{2m}(t), m = \overline{1, M}$, are duration of time when the warehouses have remained the empty in the time interval $(0, t]$.

The Eqs. (2), (3) are usual, for storage theory, balance relations describing input and output processes of material flows [3]. The conditions

$$W_m > U_m, m = \overline{1, M}, \quad (4)$$

are necessary to avoid the trivial situations, So, for example, if for any warehouse of second phase inequality (4) isn't valid, then this warehouse will become empty with probability 1 in a finite time and will remain empty after that.

3. Analysis of mathematical model

The main results concerning analysis of the model (2), (3) we formulate as the following theorems.

Theorem 1. *The system of integral equations (2), (3) has the unique non negative solution*

$$\xi_1(t) = \xi_1(0) + X(t) - Wt + WI_1(t), \quad (5)$$

$$\xi_{2m}(t) = \xi_{2m}(0) + V_m t - W_m I_1(t) + U_m I_{2m}(t), \quad (6)$$

where

$$WI_1(t) = \max \{0, -\xi_1(0) - \inf_{0 \leq \tau \leq t} [X(\tau) - W\tau]\},$$

$$U_m I_{2m}(t) = \max \{0, -\xi_{2m}(0) - \alpha_m \xi_1(0) - \inf_{0 \leq \tau \leq t} [\alpha_m X(\tau) - U_m \tau]\}, m = \overline{1, M}; V_m = W_m - U_m;$$

$$\alpha_m = W_m / W.$$

The proof of Theorem 1 is based on reduction of Eqs. (2), (3) to classical storage model [3]. To prove it we multiply both sides of Eq. (2) by α_m , take the sum of Eqs.(2) and (3), and take into account the identity

$$u(\xi_1(t)) u(\xi_{2m}(t)) = u(\alpha_m \xi_1(t) + \xi_{2m}(t)).$$

After these manipulations we arrive at the following equation for the process $\varsigma_m(t) = \xi_1(t) + \xi_{2m}(t)$:

$$\varsigma_m(t) = \varsigma_m(0) + \alpha_m X(t) - U_m(t - I_{2m}(t)). \quad (7)$$

The Eqs. (2) and (7) are the classical storage models with the Levy input processes $X(t)$, $\alpha_m X(t)$ and the release rates W , U_{2m} correspondingly. Applying the known results for classical storage model [3] we get the formulas (5) and (6).

The further results are related to determination of joint distribution of stochastic processes $\xi_1(t), \xi_{2m}(t), I_1(t), I_{2m}(t)$. Let us denote

$$\Psi_m^*(\mathbf{s}, \dot{E}, \mathbf{x}; \omega) = \int_0^{\infty} \Psi_m(\mathbf{s}, \dot{E}, \mathbf{x}; \omega) e^{-\omega t} dt, \operatorname{Re} \omega > 0,$$

$$\text{where } \Psi_m(\mathbf{s}, \dot{E}, \mathbf{x}; t) = \mathbf{E}\{\exp[-(\mathbf{s}, \xi(t)) - (\dot{E}, \mathbf{I}_m(t)) | \xi(0) = \mathbf{x}\},$$

$$\mathbf{s} = (s_1, s_2), \dot{E} = (\omega_1, \omega_2), \mathbf{x} = (x_1, x_2) \geq \mathbf{0}.$$

Theorem 2. *The Laplace transform of conditional joint distribution of random vectors $\xi(t)$ and $\mathbf{I}_m(t)$ is given by*

$$\Psi_m^*(\mathbf{s}, \dot{E}, \mathbf{x}; \omega) = [e^{-(\mathbf{s}, \mathbf{x})} - (s_1 W - s_2 W_m + \omega_1) H_{2m}^*(s_2, \dot{E}, \mathbf{x}; \omega) - (s_2 U_m + \omega_2) H_{1m}^*(\dot{E}, \mathbf{x}, \omega)] [\omega + s_2 V_m - s_1 W + \phi(s_1)]^{-1}, \quad (8)$$

$$\operatorname{Re} \omega > 0, \operatorname{Re} s_i > 0, \operatorname{Re} \omega_i > 0, i = 1, 2,$$

$$H_{1m}^*(\dot{E}, \mathbf{x}; \omega) = \frac{\exp[-(x_1 + x_2 / \alpha_m) \eta_{1m} - \omega_1 x_2 / W_m]}{\omega_2 + U_m (\omega_1 + \eta_{1m} W) / W_m},$$

$$H_{2m}^*(s_2; \dot{E}, \mathbf{x}; \omega) =$$

$$= [\exp(-s_2 x_2 - \eta_{2m} x_1) - (s_2 U_m + \omega_2) H_{1m}^*(\dot{E}, \mathbf{x}; \omega)] \times$$

$$\times (W \eta_{2m} - W_m s_2 + \omega_1)^{-1},$$

$\eta_{1m} \equiv \eta_{1m}(\omega_1, \omega), \eta_{2m} \equiv \eta_{2m}(s_2, \omega)$ are the unique continuous solutions to the functional equations

$$\omega + \omega_1 V_m / W_m - U_m \eta_{1m} / \alpha_m + \phi(\eta_{1m}) = 0, \quad (9)$$

$$\omega + s_2 V_m - W \eta_{2m} + \phi(\eta_{2m}) = 0 \quad (10)$$

with the following properties:

$$a) \left. \frac{d}{d\omega} \eta_{1m}(0, \omega) \right|_{\omega=0+} = \begin{cases} \alpha_m (U_m - \alpha_m \gamma)^{-1}, & \alpha_m \gamma < U_m \\ \infty, & \alpha_m \gamma = U_m, \end{cases}$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial \omega} \eta_{2m}(0, \omega) \right|_{\omega=0+} = \begin{cases} (W - \gamma)^{-1}, & \gamma < W \\ \infty, & \gamma = W, \end{cases}$$

where $\gamma = \phi'(0) = EX(1) < \infty$; $\phi(s)$ is the cumulant of $X(t)$ (see (1));

b) as $\omega \rightarrow 0+$, $\eta_{1m}(0, \omega) \rightarrow \eta_{1m}^0$, where η_{1m}^0 is the largest positive root of the equation $U_m \eta_{1m}^0 = \alpha_m \phi(\eta_{1m}^0)$ and $\eta_{1m}^0 \geq 0$, iff $\alpha_m \gamma > U_m$.

The proof of Theorem 2 may be given by analogy with the corresponding theorem in theory of classical storage model (2) or (7) [3]. Particularly, the formula (8) is derived by direct calculation of expression $\Psi_m^*(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{E}}, \mathbf{x}; \omega)$ taking into account the relations (5), (6).

Using the results of Theorems 1 and 2 we can immediately determine the conditions under which there exists a limit distribution of the random vector $(\xi_1(t), \xi_{2m}(t))$, as well as examine its asymptotic distribution. Setting in (8) $s_1 = s_2 = 0, \omega_1 = 0$ we obtain

$$\int_0^{\infty} e^{-\omega t} \mathbf{E}\{\exp(-\omega_2 I_{2m}(t)) | \xi_1(0) = x_1, \xi_2(0) = x_2\} dt = \frac{1}{\omega} [1 - \omega_2 e^{-(x_1 + x_2 / \alpha_m) \eta_{1m}(0, \omega)} / (\omega_2 + \frac{U_m}{\alpha_m} \eta_{1m}(0, \omega))], \quad (11)$$

where $\eta_{1m}(0, \omega)$ is the root of functional Eq.(9) with $\omega_1 = 0$. By definition, $I_{2m}(t)$ is a monotone non decreasing function of t , therefore $I_{2m}(t) \rightarrow I_{2m} \leq \infty$ with probability one. Applying the Tauberian theorem, from (11) we get

$$\mathbf{E}\{\exp(-\omega_2 I_{2m})\} = 1 - \omega_2 \lim_{\omega \rightarrow 0+} \frac{e^{-(x_1 + x_2 / \alpha_m) \eta_{1m}(0, \omega)}}{\omega_2 + U_m \eta_{1m}(0, \omega) / \alpha_m}.$$

The last expression equals to 0 if $\gamma \leq U_m / \alpha_m$, and equals to

$$1 - \omega_2 / (\omega_2 + U_m \eta_{1m}^0 / \alpha_m) \quad (12)$$

if $\gamma > U_m / \alpha_m$.

Theorem 3. a) Let $\omega_1 = \omega_2 = 0, x_1 \geq 0, x_2 \geq 0$. Then as $t \rightarrow \infty$ if $\gamma > W$, then $\xi_1(t) \rightarrow \infty, \xi_{2m}(t) \rightarrow \infty$ in distribution. If $\alpha_m \gamma < U_m$, then process $(\xi_1(t), \xi_{2m}(t))$ converges weakly to random vector (ξ_1, ξ_{2m}) with distribution given by the Laplace-Stieltjes transform

$$E\{e^{-s_1 \xi_1 - s_2 \xi_{2m}}\} = (U_m - \gamma \alpha_m) \frac{s_2 W}{s_1 W - s_2 V_m - \phi(s_1)} \times \frac{s_1 - \eta_{2m}(s_2, 0+)}{W_m s_2 - W \eta_{2m}(s_2, 0+)}, \quad \text{Re } s_i > 0, i=1,2, \quad (13)$$

where $\eta_{2m}(s_2, 0+) = \lim_{\omega \rightarrow 0+} \eta_{2m}(s_2, \omega)$.

b) If $\frac{U_m}{\alpha_m} < \gamma < W, \sigma^2 < \infty$,

then $\lim_{t \rightarrow \infty} P\left\{\frac{\xi_{2m}(t) - (\alpha_m \gamma - U_{2m})t}{\alpha_m \sigma \sqrt{t}} \leq x\right\} = N(x)$,

where $N(x)$ is standard normal distribution with zero mean and unit variance;
 $\sigma^2 = -\phi''(0) = \text{Var}X(1)$.

c) If $\gamma < U_m / \alpha_m, \sigma^2 < \infty$,

then $\lim_{t \rightarrow \infty} P\left\{\frac{U_m I_{2m}(t) - (U_m - \alpha_m \gamma)t}{\alpha_m \sigma \sqrt{t}} \leq x\right\} = N(x)$.

The proof of point a) of Theorem 3 is based on the formula (8) and application of the Tauberian theorem. To prove the point b) note that from (7), it follows

$$\frac{\xi_{2m}(t) - (\gamma \alpha_m - U_m)t}{\alpha_m \sigma \sqrt{t}} = \frac{\alpha_m \xi_1(0) + \xi_{2m}(0)}{\alpha_m \sigma \sqrt{t}} + \frac{X(t) - \gamma t}{\sigma \sqrt{t}} - \frac{\xi_1(t)}{\sigma \sqrt{t}} + \frac{U_m I_{2m}(t)}{\alpha_m \sigma \sqrt{t}}.$$

It is obvious that the first addend in right-hand side of the last relation tends to 0 as $t \rightarrow \infty$. If $\alpha_m \gamma > U_m$, then from (12) follows the existence of finite limit of $I_{2m}(t)$, therefore $I_{2m}(t) / \sqrt{t} \rightarrow 0$ in distribution. Since $\gamma < W$, there exists the limit distribution of process $\xi_1(t)$, hence $\xi_1(t) / \sqrt{t} \rightarrow 0$. Therefore

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} P\left\{\frac{\xi_{2m}(t) - (\alpha_m \gamma - U_m)t}{\alpha_m \sigma \sqrt{t}} \leq x\right\} = \\ = \lim_{t \rightarrow \infty} P\left\{\frac{X(t) - \gamma t}{\sigma \sqrt{t}} \leq x\right\}. \end{aligned}$$

But for the Levy process $X(t)$ the last limit equals to $N(x)$ [3]. The point c) of Theorem 3 may be proved similarly.

Note that $\zeta_m(t) = 0$ if $\xi_1(t) = \xi_{2m}(t) = 0$. As it follows from theory of classical storage model and Eq. (7) if $\alpha_m \gamma < U_m$, then

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P\{\zeta_m(t) = 0\} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{\xi_1(t) = 0, \xi_{2m}(t) = 0\} = 1 - \alpha_m \gamma / U_m.$$

Setting in (13) $s_1 = 0, s_2 = s$ we have

$$f(s) \equiv E\{e^{-s\xi_{2m}}\} = \frac{U_m}{V_m} \left(1 - \frac{\alpha_m \gamma}{U_m}\right) \frac{W \eta_{2m}(s, 0+)}{W \eta_{2m}(s, 0+) - sW}. \quad (14)$$

Using this formula we can calculate the stationary mean and variance:

$$E\xi_{2m} = -f'(0) = \frac{V_m \alpha_m \sigma^2}{2(W - \gamma)(U_{2m} - \alpha_m \gamma)}, \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}\xi_{2m} = f''(0) - (f'(0))^2 = & \frac{\alpha_m V_m^3}{6(W - \gamma)(U_m - \alpha_m \gamma)^2} \times \\ & \times \{2\sigma^4(W_m + U_m - 2\alpha_m \gamma) + 2\phi'''(0)(W - \gamma)(U_m - \alpha_m \gamma)\} - \\ & - (E\xi_{2m})^2. \end{aligned}$$

For example, if $\phi(s) = \lambda(1 - \beta(s))$, then $\phi^{(k)}(0) = (-1)^{k+1} \lambda \beta^{(k)}$, where $\beta^{(k)}, k = 1, 2, 3$, are the first three initial moments of d.f. $B(x)$.

These results may be used for approximate determination of warehouses' capacities and formulation of some optimization problems.

For example, let us it is required to find out the values $U_m, m = \overline{1, M}$, that minimize mean current cost for storage of final products and costs for their transportation (\bar{E}). The objective function is given by

$$\bar{E} = \sum_{m=1}^M (e_m U_m + c_m E\xi_{2m}), \quad (16)$$

where e_m is transportation cost for delivery of 1 t of m -th final product to consumers; c_m is storage expenses per unit of time for 1 t of m -th final product. Taking into account the formula (15) we can re-write the expression (16)

$$\bar{E} = \sum_{m=1}^M e_m U_m + \frac{\sigma^2}{2(W - \gamma)} \sum_{m=1}^M \frac{c_m \alpha_m (W_m - U_m)}{U_m - \alpha_m \gamma}. \quad (17)$$

We assume that the following condition hold true:

$$\sum_{m=1}^M E\xi_{2m} = \frac{\sigma^2}{2(W-\gamma)} \sum_{m=1}^M \frac{\alpha_m(W_m - U_m)}{U_m - \alpha_m\gamma} \leq C, \quad (18)$$

where C is the given total capacity of warehouses for final products storage. The additional constraints are just the stability conditions

$$U_m < \alpha_m\gamma, m = \overline{1, M}. \quad (19)$$

The stochastic optimization problem (17)-(19) may easily be solved by the Lagrange multipliers method. Its solution is given by

$$U_m = W_m \left[\frac{\gamma}{W} + \sigma \sqrt{\frac{c_m + \mu}{2e \frac{W}{m} \frac{W}{m}}} \right], \quad m = \overline{1, M},$$

where μ is Lagrange multiplier which may be found as the unique root of the equation

$$\sum_{m=1}^M \alpha_m \sqrt{e \frac{W}{m} / (c_m + \mu)} = \sigma \sqrt{W/2} [1 + 2C(W - \gamma) / \sigma^2] / (W - \gamma).$$

4. Conclusions

The results obtained show that it is possible to investigate by analytical means the stochastic models of storage networks on the basis of classical models for single storehouse. The further development of our approach may concern the following directions:

- a) Consideration of several kinds of raw materials; but here we must take into account the following circumstance: once a warehouse for storage of any kind of raw materials has been empty, then corresponding technological lines (machines) which process these raw materials must be stopped.
- b) Taking into account the irregularity of raw materials delivery at enterprise and random fluctuation of demand for final product. Here, it is possible to use the mathematical technique given in the book [3] (Markov-compound Poisson input and Markov-modulated demand).
- c) Investigation of models of manufacturing systems by representation their as stochastic storage networks with more complex topology.

REFERENCES

1. Kelly, F.P. (1979). Reversibility and Stochastic Networks. New York, J. Wiley & Sons.
2. Neuts, M.F. (1995). Matrix-Geometric Solutions in Stochastic Models: An Algorithmic Approach. Boston, 2nd Ed. Dover Publ.
3. Kulkarni, V.G. (1995). Modeling and Analysis of Stochastic Systems. London, Chapman & Hall.
4. Prabhu, N.U. (1998). Stochastic Storage Processes: Queues, Insurance Risk, Dams, and Data Communication. New York, 2nd Ed. Springer Verlag.

5. Ost, A. (2001). Performance of Communication Systems – A Model-Based Approach with Matrix-Geometric Methods. Berlin, Springer Verlag.
6. Ryzhikov, Yu.I. (2001). Queueing Theory and Inventory Control [Teoriya ocheredej i upravlenie zapasami]. St.-Petersburg [in Russian], 384 p.
7. Voevodskiy, E.N., & Postan, M.Ya. (1991). Stochastic Model of Multi-Phase Storage System. Communications of Academy of Science of USSR. 318(1), 5156.
8. Postan, M.Ya. (1995). On Application of Stochastic Processes of the Stock Theory to Modeling Computerized Information Networks. Prob. Inform. Transm., 31(3), 262–283.
9. Postan, M.Ya. (2000). Theory of Stochastic Storage Networks: Present State and Perspectives. In: Proc. of 16th IMACS World Congress 2000 on Scientific Computation, Applied Mathematics, and Simulation, CD, File CP 216-5. Lausanne.
10. Postan, M.Ya. (2006). Economic-Mathematical Models of Multimodal Transport [Ekonomiko-matematicheskie modeli smeshannyh perezovok]. Odessa, Astroprint [in Russian], 376 p.

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.577:658

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.06>

ТЕПЛОВІ НАСОСИ ДЛЯ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТА ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВ МАШИНОБУДУВАННЯ

М.В. Босий

старший викладач кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва
Центральноукраїнський національний технічний університет,
Кропивницький, Україна
ORCID ID: 0000-0002-3090-0427

Анотація

Вступ. У статті розглядається проблема використання теплових насосів (ТН), що працюють на альтернативних джерелах енергії для теплопостачання та гарячого водопостачання будівель підприємств машинобудування. У своїй роботі ТН використовують низькопотенційну теплоту повітря, водойм і надр землі. **Метою** роботи є обґрунтування та дослідження доцільності використання ТН на підприємствах машинобудування. **Результати.** Виконано аналіз характеристик ТН, що працюють з різними джерелами низькопотенційної теплоти. Визначено фактори, які впливають на енергетичну ефективність ТН, оцінені особливості роботи ґрунтових, водяних та повітряних ТН для кліматичних умов України. Проаналізовано вплив тривалості температур повітря різних величин на теплопродуктивність ТН. Для підвищення ефективності роботи теплонасосної системи запропоновано схему вилучення низькопотенційної теплоти з використанням ґрунтового ТН і повітряного теплообмінника. На підставі проведених досліджень встановлено, що перевагою повітря як теплоносія, є те, що повітряні ТН можуть працювати практично повсюди і не вимагають облаштування низькотемпературного контуру. Перспективним способом підвищення ефективності ТН при річному циклі його роботи є комбіноване використання низькопотенційної теплоти ґрунту та повітря. Теплонасосна система з двома джерелами енергії забезпечує високу теплопродуктивність ТН протягом всього року і має більш високий показник енергетичної ефективності у порівнянні з традиційними рішеннями. ТН мають значну перевагу перед іншими теплоенергетичними установками. Вони споживають енергію поновлюваних джерел, знижують витрати на електропостачання більш, ніж в половину – це повністю автоматизований пристрій. **Висновки.** Використання ТН для утилізації низькопотенційних теплових потоків економічно вигідно. Аналіз ефективності систем теплопостачання показує, що в сучасних економічних умовах тенденція систем теплопостачання може розвиватися в наступних напрямках: застосування парокомпресійних

ТН, використання вторинних енергоресурсів промислових підприємств машинобудування, підвищення теплотехнічних характеристик будівель. Модернізація із застосуванням даних заходів може суттєво підвищити економічні і технічні характеристики тепlopостачального обладнання для будівель підприємств машинобудування.

Ключові слова: тепловий насос, термодинамічний цикл, тепла енергія, низькопотенційне джерело теплоти, системи тепlopостачання, коефіцієнт трансформації.

HEAT PUMPS FOR HEAT SUPPLY AND HOT WATER SUPPLY OF MARITIME TRANSPORT COMPANIES

M.V. Bosyi

Senior Lecturer at the Department of Materials Science and Foundry
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-3090-0427

Summary

Introduction. *The article examines the problem of using heat pumps (TN) operating on alternative energy sources for heat supply and hot water supply of buildings of machine-building enterprises. **The purpose of the work** is to substantiate and investigate the expediency of using TN at machine-building enterprises. **The results.** An analysis of the characteristics of TNs operating with various sources of low-potential heat was performed. The factors affecting the energy efficiency of TN are determined, the peculiarities of the operation of soil, water and air TN for the climatic conditions of Ukraine are evaluated. The influence of the duration of air temperatures of different values on the thermal productivity of TN was analyzed. In order to increase the efficiency of the heat pump system, a scheme for extracting low-potential heat with the use of soil TN and an air heat exchanger is proposed. On the basis of the conducted research, it was established that the advantage of air as a heat carrier is that air heaters can work almost everywhere and do not require the arrangement of a low-temperature circuit. A promising way to increase the efficiency of the TN during the annual cycle of its operation is the combined use of low-potential heat of the soil and air. A heat pump system with two sources of energy ensures high thermal productivity of the heating system throughout the year and has a higher energy efficiency index compared to traditional solutions. TNs have a significant advantage over other thermal power plants. They consume energy from renewable sources, reduce electricity costs by more than half. It is a fully automated device. **Conclusions.** The use of TN for the disposal of low-potential heat flows is economically beneficial. The analysis of the efficiency of heat supply systems shows that in modern economic conditions, the trend of heat supply systems can develop in the following directions: the use of steam-compression heating systems, the use of secondary energy resources of industrial engineering enterprises, and the improvement of the thermal characteristics of buildings. Modernization with the application of these measures can significantly improve the economic and technical characteristics of heat supply equipment for buildings of machine-building enterprises.*

Key words: heat pump, thermodynamic cycle, thermal energy, low-potential heat source, heat supply systems, transformation coefficient.

Вступ. Натепер зі скороченням запасів твердих, рідких і газоподібних видів органічного палива та зростанням цін на енергоносії, як в Україні, так і у світі в цілому, необхідно на сучасному етапі використовувати та впроваджувати найновіші технології з використанням відновлювальних альтернативних природних джерел енергії, які відкривають для сьогодення можливість до енергозбереження і зменшення викидів парникових газів в довкілля – це теплові насоси [1–9].

На теперішньому етапі розвитку енергоефективних екологічно чистих теплонасосних технологій для систем теплопостачання сучасним екологічним та найефективнішим джерелом енергії для системи опалення є використання енергії землі, що міститься у повітрі, ґрунті та воді. Тому ТН типу «повітря–вода», «ґрунт–вода» і «вода–вода» працюють з високими показниками ефективності і за опалювальний період заощаджують до 70% коштів у порівнянні із традиційною системою опалення газовим котлом, що є вигідною інвестицією на майбутнє [9–15].

Постановка проблеми. Використання для теплопостачання традиційних джерел енергії потребує відповідних фінансових затрат зі скороченням запасів твердих, рідких і газоподібних видів органічного палива та зростанням цін на енергоносії. Тому, необхідно впроваджувати теплонасосні технології з використанням поновлюваних альтернативних джерел енергії, які відкривають можливість до енергозбереження і зменшення викидів парникових газів в атмосферу. Проблема зниження затрат на опалення та гаряче водопостачання актуальна натепер і для підприємств машинобудування [12–15].

Підвищення енергоефективності ТН, які використовують геотермальну теплоту, в наш час є одним із найважливіших питань для подальшого розвитку та впровадження технологій застосування відновлювальних джерел енергії в системах теплопостачання і також для підприємств машинобудування [13–15].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. ТН сприяють зменшенню використання органічного палива шляхом заміщення первинної енергії вторинними енергетичними ресурсами, є одним з перспективних напрямків розвитку сучасної енергетики і знаходиться в центрі уваги зарубіжних і українських дослідників. В країнах Європи, Америки та Азії ТН використовуються більше 35 років для теплопостачання житлових і офісних будівель, а також різних приміщень. Найбільші енергетичні компанії займаються проектуванням, виготовленням і впровадженням ТН. Міжнародне Енергетичне Агентство (МЕА), в яку асоційованими членами входять 28 енергетично розвинених країн і метою діяльності якого є забезпечення енергетичної безпеки і пошук шляхів поліпшення екологічної ситуації є головним координатором політики впровадження ТН. Досвід зарубіжних країн, таких як Швеція, Фінляндія, Німеччина і інших доводить доцільність застосування ТН. При проектуванні та реконструкції сучасних систем теплопостачання необхідно враховувати можливість використання технології ТН. Застосування ТН в комплексі з традиційною стемою теплопостачання для систем опалення, кондиціонування і вентиляції великих об'єктів забезпечує повну автономність зон регулювання та істотну економію паливно-енергетичних ресурсів навіть при використанні традиційних джерел енергії [13–15].

Термодинамічний цикл теплового насосу аналогічний холодильній машині, але навпаки. У тепловому насосі конденсатор є теплообмінним апаратом, що

виділяє теплоту для споживача, а випарник – теплообмінним апаратом, що утилізує низькопотенційну теплоту (вторинні енергетичні ресурси і нетрадиційні поновлювані джерела енергії). Залежно від принципу роботи ТН поділяються на компресійні і абсорбційні. Компресійні теплові насоси завжди приводяться в дію за допомогою механічної енергії (електроенергії), у той час, як абсорбційні ТН можуть також використовувати теплоту в якості джерела енергії (за допомогою електроенергії або палива). Найбільше розповсюдження отримали компресійні ТН [13–16]. Принципова схема теплового насоса наведена на рис. 1.

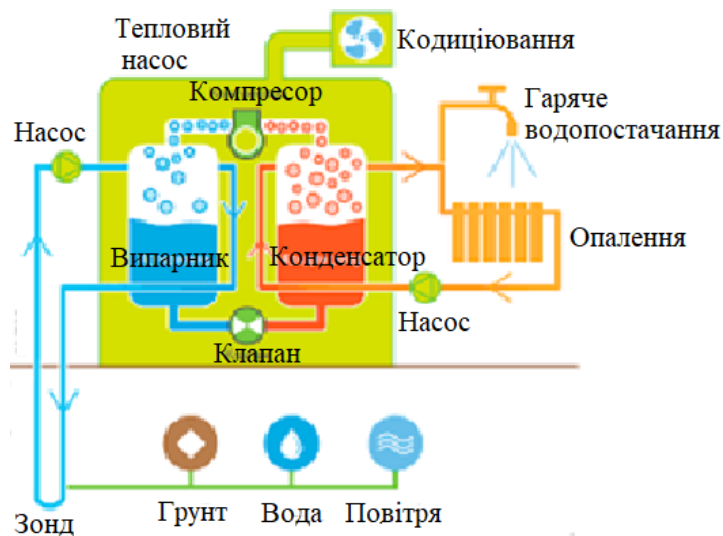


Рис. 1. Принципова схема ТН [7; 13–15]

Формулювання цілей статті. Метою статті є обґрунтування та дослідження доцільності використання ТН на підприємствах машинобудування.

Виклад основного матеріалу. Залежно від джерела відбору низькопотенційної теплоти ТН поділяють на: геотермальні ґрунтові (ґрунт-вода), водяні (вода-вода) та повітряні (повітря-вода), а також ТН, які використовують вторинну теплоту. Горизонтальний колектор у геотермальних ТН, які використовують теплоту землі, наземних або підземних ґрунтових вод, ґрунту розміщується кільцями або спіралями нижче глибини промерзання ґрунту (зазвичай від 1,5 м і більше) з розрахунку: один метр труби еквівалентний 25–35 Вт. Труби заповнюються антифризом (розчин пропілен-гліколю). Відстань між трубами повинна бути не менше 0,5–0,6 м. Після нескладних математичних підрахунків визначаємо, що для отримання 15 кВт енергії, буде потрібно контур довжиною 350–550 метрів. Контур укладається досить компактно, займаючи приблизно до 650 квадратних метрів площі. Такий спосіб є найбільш економічно ефективним для об'єктів підприємств машинобудування за умови відсутності дефіциту земельної площі під контур [17; 18].

Колектор геотермального ТН може розміщуватись і вертикально в свердловині, кожен метр труби буде дорівнювати 55–65 Вт енергії. Для нормальної

роботи геотермального насоса потужністю 15 кВт, буде потрібно створити контур загальною глибиною 180–250 м. Труби заповнюються, як правило, антифризом (розчин пропілен–гліколю). Свердловина заповнюється ґрунтовими водами природним шляхом і вода передає теплоту до теплоносія. При недостатній довжині свердловини або спробі отримати від ґрунту надлишкову потужність, ця вода і, навіть, антифриз можуть замерзнути, що і обмежує максимальну теплову потужність таких систем. Цей спосіб застосовується у випадках, коли площа земельної ділянки не дозволяє розмістити контур горизонтально [14; 15; 19; 20].

Геотермальний ТН з вертикальним контуром (система «ґрунт-вода»), в якому колектор розміщується спіралями або кільцями у водоймі (морі, озері, ставку, річці) нижче глибини промерзання. Такий варіант є ідеальним за всіма показниками: короткий контур, найбільш висока температура навколишнього середовища, як наслідок висока ефективність роботи. Один метр труби підводного контуру дорівнює 35 Вт теплової енергії. Для отримання 15 кВт теплоти, потрібно 350 метра контурної труби. Це найбільш дешевий варіант, але є вимоги по мінімальній глибині і обсягу води у водоймі для конкретного регіону підприємств машинобудування. Геотермальний ТН з притопленим контуром (система «вода-вода») – водні (ґрунтові води). Ґрунтові води є кращим джерелом енергії, завдяки тому, що навіть в зимовий час температура цього ресурсу не опускається нижче негативної позначки та знаходиться в діапазоні від +5 до +15 °С. ТН, які отримують енергію від ґрунтових вод, мають найбільш високий ККД. Проходячи через нього, вода віддає свою теплоту [20].

Повітряні ТН використовують як джерело низькопотенційної теплової енергії повітря. Причому джерелом теплоти може бути не тільки зовнішнє (атмосферне) повітря, а й витяжне вентиляційне повітря (загальнообмінної або місцевої) вентиляції будівель підприємств машинобудування. Даний ТН не вимагає монтажу підземного чи підводного контуру. Як правило, установки даного типу використовуються в тому випадку, коли інші варіанти відбору теплоти не можуть бути реалізовані. Теплова енергія повітря використовується до позначки –15 °С. При великих морозах і температурі нижче цього показника, використовується додатковий теплогенератор. Для ТН Heloitem, які мають робочий діапазон температур від –25 до +45 °С додатковий теплогенератор не потрібний [21]. Існують також повітряні ТН, які відбирають низькопотенційну теплоту з повітря і використовують його для обігріву приміщень в будинку за допомогою повітряної каналної системи (система «повітря-повітря»). Особливість даного типу повітряного ТН в тому, що вони працюють або в режимі нагріву, або в режимі охолодження. Повітряне опалення використовується в офісних будівлях, торгових центрах, промислових і складських приміщеннях [22].

ТН, які використовують вторинну теплоту (наприклад, теплоту трубопроводу центрального опалення, вентиляційні викиди тощо) є найбільш доцільним варіантом для промислових об'єктів машинобудування, де є джерела скидної теплоти, які вимагають утилізації. Одним з найефективніших джерел даного типу є використання відпрацьованої теплоти повітряних та холодильних компресорів, оскільки вона має високу температуру. За останні роки в різних засобах масової інформації, включаючи Інтернет видання, з'явилися численні публікації, що

стосуються використання технології ТН в системах опалення і гарячого водопостачання об'єктів різної сфери – від окремих будинків до житлових мікрорайонів [3; 7; 10–15; 19–22]. Внаслідок зниження питомих тепловтрат будівлі актуальною стала тематика низькопотенційних систем опалення. Актуалізація сталася через те, що знизилися розрахункові температурні режими систем, а це спричинило зменшення габаритних розмірів опалювальних приладів (у більшості випадків радіаторів). Основною перевагою ТН є можливість перемикання з режиму опалення взимку на режим кондиціонування влітку: просто замість радіаторів до зовнішнього колектору підключаються фанкойли або (система «холодні стелі»).

ТН надійний, його роботою керує автоматика. В процесі експлуатації система не потребує спеціального обслуговування. ТН компактний (його модуль за розмірами не перевищує звичайний холодильник) і практично безшумний. Період окупності ТН становить 4–6 років, при терміні служби 15–20 років до капітального ремонту. Реальні значення ефективності сучасних ТН становлять близько $COP = 2,5$ при температурі джерела теплоти $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ і порядку $COP = 5,5$ при температурі джерела теплоти $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Всі, навіть, найефективніші ТН нагрівають воду в системі опалення не більше $+62\dots+65\text{ }^{\circ}\text{C}$, причому, чим вище температура води, що нагрівається, тим менше ефективність і надійність ТН. Якщо теплоти із зовнішнього контуру все ж недостатньо для опалення в сильні морози, практикується експлуатація ТН в парі з додатковим генератором теплоти (в таких випадках це використання бівалентної схеми опалення). Коли вулична температура опускається нижче розрахункового рівня (температури бівалентності), в роботу включається другий генератор теплоти – найчастіше невеликий електронагрівач, рідше газовий або твердопаливний котли. Оптимальна потужність теплонасосної установки становить 60–70 % від необхідної встановленої потужності, що також впливає на закупівельну вартість установки опалення ТН. В цьому випадку ТН забезпечує не менше 95 % потреби споживача в тепловій енергії за весь опалювальний період. При такій схемі середньосезонний коефіцієнт перетворення енергії для кліматичних умов України дорівнює порядку $COP = 3$ [19; 20; 22; 23].

Найвні ресурси теплової енергії довкілля багаторазово перевищують прогнозований рівень споживання всіма секторами промисловості України. На сьогоднішній день для вирішення проблем енергозбереження ТН є найбільш перспективним серед джерел нетрадиційної енергетики. Використання відновлювальних джерел енергії дає можливість обмежити використання традиційних видів палив, зменшити забруднення довкілля. Температурні рівні основних джерел теплоти: зовнішнє повітря $+5\dots+10\text{ }^{\circ}\text{C}$, витяжна вентиляція $+15\dots+25\text{ }^{\circ}\text{C}$, озерна вода $0\dots+10\text{ }^{\circ}\text{C}$, річкова вода $0\dots+10\text{ }^{\circ}\text{C}$, морська вода $+3\dots+8\text{ }^{\circ}\text{C}$, ґрунт $0\dots+10\text{ }^{\circ}\text{C}$, ґрунтові води $>10\text{ }^{\circ}\text{C}$, геотермальна вода $+20\dots+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ [6; 9; 10; 17].

ТН компанії Heliotherm зарекомендували себе як високоякісні, ефективні та надійні джерела теплоти, вони включають в себе повітряні, ґрунтові та водяні ТН. Їх переваги: екологічність (абсолютно безпечні для навколишнього середовища); високий коефіцієнт перетворення ($COP = 5 - 7$ в залежності від виду ТН); система три в одному (опалення, гаряче водопостачання і охолодження будівлі); можливість дистанційного керування (функція Web-control) довговічність

конструкції; низький рівень шуму (до 55 дБ); можливість повної енергонезалежності (поєднання ТН з сонячною електростанцією).

ТН HelioTerm мають наступні модифікації [21]:

1. ТН «повітря-вода» Comfort Compact (теплова потужність 8–18 кВт, COP = 4,0 – 5,0) використовуються для опалення та гарячого водопостачання приватних будинків.

2. ТН «повітря-вода» Basic Comfort у поєднанні з сонячними батареями (теплова потужність 818 кВт, COP = 4,0 – 5,0) використовуються для опалення та гарячого водопостачання приватних будинків.

3. ТН «повітря-вода» Solid Split з можливістю встановлення сонячних батарей (теплова потужність 30–55 кВт, COP = 4,0 – 5,0) використовуються для опалення та гарячого водопостачання приватних та багатоквартирних будинків.

4. Грунтові ТН «розсіл-вода» Solid з можливістю встановлення сонячних батарей (теплова потужність 30–120 кВт, COP = 6,0 – 7,0) використовуються для опалення та гарячого водопостачання приватних, багатоквартирних та інших будинків.

5. Водяні ТН «вода-вода» Solid з можливістю встановлення сонячних батарей (теплова потужність 30–120 кВт, COP = 6,0 – 7,0) використовуються для опалення та гарячого водопостачання приватних, багатоквартирних та інших будинків [21].

Розглянемо встановлення водяного ТН на прикладі підприємства машинобудування. На підприємстві знаходяться дві опалювані будівлі адміністративно-побутового (опалюваний об'єм 6473 м³) та господарського корпусів (опалюваний об'єм 8287 м³), крім цього в адміністративно-побутовому корпусі також є система гарячого водопостачання (в розрахунках орієнтуємось на 25 чоловік персоналу). Необхідна теплова потужність ТН на 1 м³ опалюваного об'єму становить 80 Вт/м³, для гарячого водопостачання при витраті на 1 людину 50 літрів води при температурі 45 °С – 800 Вт/людину. Теплове навантаження адміністративно-побутового корпусу становитиме 354 кВт (з них на гаряче водопостачання 18 кВт), господарського корпусу – 745 кВт. Тому для даного підприємства найбільш актуальним буде встановлення ґрунтового ТН.

Наступний приклад – це адміністративна будівля підприємства машинобудування. Опалюваний об'єм будівлі становитиме 2635 м³. Теплове навантаження системи опалення становитиме 50,0 кВт, системи гарячого водопостачання – 5 кВт, сумарне 55 кВт. Враховуючи географічне розташування будівлі, особливості ландшафту, правила пожежної безпеки та ін. для покриття теплового навантаження даної будівлі найбільше підходить ТН HelioTerm Solid Split (повітря-вода) потужністю 55 кВт [21].

У процесі роботи ТН компресор споживає електроенергію (рис. 1). Співвідношення теплової енергії, що виробляється і електричної, яка споживається називається коефіцієнтом трансформації (або коефіцієнтом продуктивності (англ. COP – скор. від coefficient of performance) і є показником ефективності ТН [17–19]. Для розрахунку коефіцієнта трансформації COP використовується наступний вираз

$$\text{COP} = Q/E, \quad (1)$$

де Q – теплота, отримана з системи, Дж; E – отримана електроенергія, Дж; C_v – питома масова теплоємність рідини в циклі опалення, Дж/кг·К; m – маса

теплоносія, кг; Δt – різниця температур теплоносія до і після віддачі теплової енергії, К.

$$Q = m \cdot C_v \cdot \Delta t, \quad (2)$$

де C_v – питома масова теплоємність рідини в циклі опалення, Дж/кг·К; m – маса теплоносія, кг; Δt – різниця температур теплоносія до і після віддачі теплової енергії, К.

$$E = U \cdot I \cdot t, \quad (3)$$

де U – напруга, В; I – струм, А; t – час, год.

З рівняння (2) і (3) розраховуємо Q і E :

$$Q = 1000 \cdot 4,19 \cdot 40 = 167600 \text{ кДж} = 46,55 \text{ кВт} \cdot \text{год}; \quad (4)$$

$$E = 0,380 \cdot 122 \cdot 0,27 = 12,51 \text{ кВт} \cdot \text{год}. \quad (5)$$

Коефіцієнт трансформації COP ТН розраховуємо за рівнянням (1)

$$\text{COP} = 46,55 / 12,51 = 3,72. \quad (6)$$

Тобто, при температурі води 8°C на кожний кіловат електричної енергії ми отримуємо 3,72 кВт теплової енергії.

Нами було досліджено ефективність ТН при різних значеннях температури зовнішнього джерела теплоти – води (рис. 2).

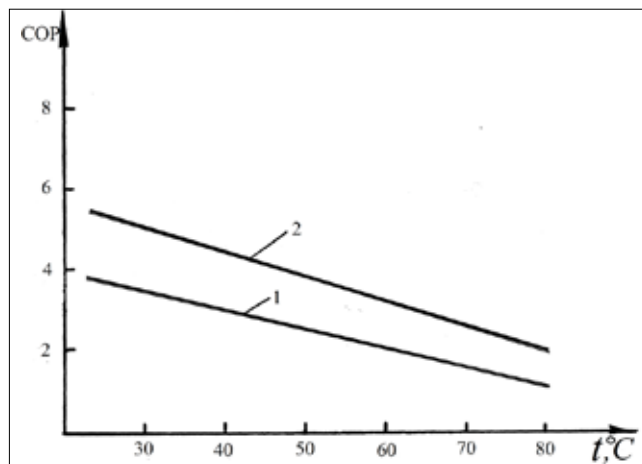


Рис. 2. Залежність COP ТН від температури системи опалення:
при температурі джерела води: 1 – при 8°C ; 2 – при 14°C [7; 13–15]

З рис. 2 видно, що коефіцієнт ефективності COP ТН залежить від зовнішньої температури джерела теплоти води і від характеру системи опалення. При збільшенні температури води з 8 до 14°C коефіцієнт ефективності COP ТН збільшується у два рази. Вибір системи опалення навіть більше впливає на ефективність ТН, ніж температура води. При заміні традиційних систем опалення на низькотемпературні ефективність ТН зростає. Тому, при проектуванні систем опалення з використанням ТН необхідно враховувати цей фактор [20; 23].

ТН характеризуються вищою ефективністю, ніж усі традиційні технології на ринку теплопостачання. Для порівняння: газовий котел при споживанні 1 кВт

електроенергії зможе виділити близько 0,9 кВт теплоти, тоді як ТН віддає 4-5 кВт теплоти. Такий результату полягає в тому, що обладнання ТН не виробляє теплоту, а переносить її [24; 25].

Висновки

Використання ТН для теплопостачання передбачає лише оплату за електроенергію на роботу та технічне обслуговування установки при порівнянні з витратами на центральне опалення та роботу газових або електричних котлів аналогічної потужності, яка в декілька раз менша. Впровадження ТН є перспективним напрямком використання альтернативних джерел енергії для забезпечення потреб систем опалення, вентиляції та гарячого водопостачання будівель. Незважаючи на свою ефективність ТН (особливо повітряні) далеко не завжди повноцінно покривають теплове навантаження будівель в сильні морози, тому необхідно поєднувати їх експлуатацію з додатковим джерелом теплоти: електричним, газовим або твердопаливним котлом, які будуть вмикатися при досягненні певного критичного значення зовнішньої температури повітря (точки бівалентності).

Найефективнішим джерелом низькопотенціальної теплової енергії є геотермальні води, оскільки значення їх температури знаходиться в межах +20...+50 °С, коефіцієнт перетворення ТН при цьому найвищий. Також високоефективними джерелами низькопотенціальної теплоти є скидна теплота від водооборотних процесів в енергетиці та промисловості, вентиляційні скиди та відпрацьована теплота повітряних і холодильних компресорів та інших підприємств машинобудування. Найбільшим потенціалом з природних низькотемпературних джерел теплоти є теплота ґрунту і ґрунтових вод, повітря, а також річкових, озерних і морських вод.

ЛІТЕРАТУРА

1. Закон України № 1959-VIII від 21.03.2017 «Про внесення змін до Закону України “Про теплопостачання” щодо стимулювання виробництва теплової енергії з альтернативних джерел енергії».
2. Маляренко В. А., Лисак Л. В. Енергетика, довкілля, енергозбереження. Х. : Рубікон, 2004. 368 с.
3. Безродний М. К., Пуховий І. І., Кутра Д. С. Теплові насоси та їх використання : навчальний посібник. Київ : НТУУ «КПІ», 2013. 312 с.
4. Остапенко О.П. Холодильна техніка та технологія. Теплові насоси : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ. 2015.123 с.
5. Арсеньєв В.М., Мелейчук С.С. Теплові насоси: основи теорії і розрахунку : навчальний посібник. Суми : СДУ. 2018. 364 с.
6. Арсеньєв В.М. Теплонасосная технология энергозбереження. Суми : Вид-во СДУ. 2009. 251 с.
7. Босий М.В., Кузик О.В. Теплові насоси для опалення та гарячого водопостачання. Findings of modern engineering research and developments: Scientific monograph. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2022, P. 24–40. URL: <http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/book/217>
8. Пісарев В.Є. Теплові насоси та холодильні установки : навчальний посібник. Київ : КНУБА. 2002. 124 с.

9. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврін В.С., Дабіжа Н.О. Теплові насоси в системах теплохолодопостачання : монографія / під. ред. акад. НАН України А.А. Долінського ; НАН України, Ін-т техн. теплофізики. Київ, 2008. 104 с.
10. Безродний М.К., Притула Н.О. Енергетична ефективність теплонасосних схем тепlopостачання : монографія. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 208 с.
11. Шевель В. И. Работа компрессоров серийного исполнения на смеси пропан-бутан в теплонасосном режиме работы. *Компрессорная техника и пневматика в XXI веке* : XIII Международная научно-техническая конференция по компрессоростроению. Сумы : СумГУ, 2004. С. 239-244.
12. Хмельнюк М. Г., Мартынюк М. О. Повышение эффективности установки низкотемпературной конденсации природного газа. Одесса : ОДАХ. *Технические газы*. № 4. 2008. С. 30–35.
13. Босий М.В., Кузик О.В. Ефективність циклу теплового насоса для тепlopостачання. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020. Вип. 3(34). С. 136–142. URL: <http://dSPACE.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/10447>
14. Босий М.В. Термодинамічна енергоефективність геотермального теплового насоса на ґрунтових водах. *Moderní aspekty vědy: XX. Díl mezinárodní kolektivní* : monografie / Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika : Publishing Group „Vědecká perspektiva“, 2022. S. 556–568. URL: <http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/monography-20.pdf>
15. Босий М.В. Теплові насоси – енергоефективне відновлювальне екологічне чисте джерело теплоти. *Moderní aspekty vědy: XXI Díl mezinárodní kolektivní* : monografie Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika : Publishing Group „Vědecká perspektiva“, 2022. P. 357–380. URL: <http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/monography-21.pdf>
16. Морозюк Т. В. Теория холодильных машин и тепловых насосов. Одесса: Студия «Негоциант». 2006. 712 с.
17. Ткаченко С.Й., Остапенко О.П. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах тепlopостачання : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2009. 176 с.
18. Арсеньев В. М., Гречаненко В. А. Эксергетическая оценка эффективности теплонасосной технологии энергосбережений. *Вісник Сумського державного університету*. 2002. № 9(42). С. 81–85.
19. Босий М.В., Кропивний В.М., Кузик О.В., Кропивна А.В., Молокост Л.А. Термодинамічна енергоефективність парокомпресійного теплового насоса на ґрунтових водах. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Кропивницький, 2022, вип. 5(36), ч. I. С. 47–54. URL: http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/36_I.html
20. Босий М.В., Кропивний В.М., Кузик О.В. Термодинамічне дослідження циклу теплового насосу «ґрунт–вода» для системи опалення

- приміщення. *Науковий журнал Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. Кременчук. 2022. № 1(132), С. 165–172. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.1.22>. URL: <http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/pravila.php>
21. Сірко З.С., Коренда В.А., Вишняков І.Ю., Протасов О.С., Охріменко С.М., Цірень Н.Л. Використання теплових насосів для опалення та гарячого водопостачання будівель підприємств на прикладі установок Helioterm. *Наукові доповіді НУБіП України. Техніка і енергетика АПК*. 2020. № 5 (87).
22. Босий М.В. Енергетична ефективність повітряного теплового насоса на екологічно чистому робочому тілі пропані. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Київ. 2022. Том 33 (72), № 4. С. 144–148. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/22>. URL: <https://tech.vernadskyjournals.in.ua/33-72-4>
23. Босий М.В., Лисенко А.Я., Мануйлович В.В., Панішко О.В. Ефективність циклу геотермального теплового насосу. *Актуальні питання сучасної науки, суспільства та освіти : V Міжнародна науково-практична конференція. The 5th International scientific and practical conference «Topical issues of modern science, society and education» (November 28–30, 2021) SPC «Sci-conf.com.ua», Kharkiv, Ukraine. 2021. 2101 p., с. 418–422. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/TOPICAL-ISSUES-OF-MODERN-SCIENCE-SOCIETY-AND-EDUCATION-28-30.11.21.pdf>*
24. Босий М.В., Лисенко А.Я., Мануйлович В.В., Баркар М.М. Термодинамічна енергоефективність геотермального теплового насоса «вода-вода». // *The 3rd International scientific and practical conference “Modern science: innovations and prospects” (December 5-7, 2021) SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 2021. 1036 p. ISBN 978-91-87224-02-7. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/MODERN-SCIENCE-INNOVATIONS-AND-PROSPECTS-5-7.12.21.pdf>*
25. Босий М.В., Лисенко А.Я., Мануйлович А.В., Панішко О.В., Баркар М.М. Геотермальний тепловий насос «грунт-вода». *The 2nd International scientific and practical conference – “Modern research in world science” (May 15–17, 2022) SPC – “Sci-conf.com.ua”, Lviv, Ukraine. 2022. P.406-413. ISBN 978-966-8219-86-3. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/05/MODERN-RESEARCH-IN-WORLD-SCIENCE-15-17.05.22.pdf>*

REFERENCES

1. Law of Ukraine № 1959-VIII of 21.03. (2017). “On Amendments to the Law of Ukraine” On Heat Supply “to stimulate the production of thermal energy from alternative energy sources” [Pro vnesennya zmin do Zakonu Ukrainy “Pro teplopostachannya” shchodo stymulyuvannya vyrobnytstva teplovoyi enerhiyi z alternatyvnykh dzherel enerhiyi”] [in Ukrainian].

2. Malyarenko, V.A., & Lysak, L.V. (2004). Energy, environment, energy saving [Enerhetyka, dovkillya, enerhozberezhennya]. X. : Rubicon. 368 p. [in Ukrainian].
3. Bezrodnyi, M.K., Pukhovii, I.I., & Kutra, D.S. (2013). Heat pumps and their use [Teplovi nasosy ta yikh vykorystannya]. Tutorial. Kyiv : NTUU “KPI”. 312 p. [in Ukrainian].
4. Ostapenko, O.P. (2015). Refrigeration equipment and technology. Heat pumps [Kholodylna tekhnika ta tekhnolohiya. Teplovi nasosy]. Tutorial. Vinnytsia: VNTU. 123 p. [in Ukrainian].
5. Arsenyev, V.M., & Meleychuk, S.S. (2018). Heat pumps: basics of theory and calculation [Teplovi nasosy: osnovy teorii i rozrakhunku]. Tutorial. Sumy. SSU 364 p. [in Ukrainian].
6. Arsenyev, V.M. (2009). Heat pump energy saving technology [Teplonasosnaya tekhnolohyya enerhozberezhennya]. Sumy: Type of SDU. 251 p.
7. Bosyi, M.V., & Kuzyk, O.V. (2022) Heat pumps for heating and hot water supply [Teplovi nasosy dlya opalennya ta haryachoho vodopostachannya]. Findings of modern engineering research and developments: Scientific monograph. Riga, Latvia : Baltija Publishing. P. 2440 [in Ukrainian]. URL: <http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/book/217>
8. Pisarev, V.E. (2002). Heat pumps and refrigeration units [Teplovi nasosy ta kholodylni ustanovky]. Tutorial. K: KNUBA. 124 p. [in Ukrainian].
9. Snezhkin, Y.F., Chalayev, D.M., Shavrin, V.S., & Dabyzha, N.O. (2008). Heat pumps in heating and cooling systems [Teplovi nasosy v systemakh teplokholodopostachannya]. Monograph. Sub. ed. Acad. NAS of Ukraine A.A. Dolinskyi; National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Technology thermophysics. K. : 104 p. [in Ukrainian].
10. Bezrodnyi, M.K., & Prytula, N.O. (2012). Energy efficiency of heat pump heat supply schemes [Enerhetychna efektyvnist teplonasosnykh skhem teplopostachannya]. Monograph. K: NTUU “KPI”. 208 p. [in Ukrainian].
11. Shevel, V.I. (2004). Operation of series compressors for propane-butane oil in the heat pump mode [Rabota kompressorov seryynoho yspolnenyya na smecy propan-butan v teplonasosnom rezhyme raboty]. Compressor technology and pneumatics in the 21st century: 13th International Scientific and Technical Conference on Compressor Construction. Sumy: Sumy State University. P. 239–244 [in Ukrainian].
12. Khmelnyuk, M.G., & Martynyuk, M.O. (2008). Increasing the efficiency of a low-temperature natural gas condensation plant [Povyshenye éffektyvnosti ustanov-ky nyzkotemperaturnoy kondensatsyy pryrodnoho haza]. Odessa: ODAH. *Technical gases*. No. 4. P. 30–35 [in Ukrainian].
13. Bosyi, M.V., & Kuzyk, O.V. (2020). Efficiency of the heat pump cycle for heat supply [Efektyvnist tsykladu teplovoho nasosa dlya teplopostachannya]. *Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences*. Issue 3(34). P. 136–142. [in Ukrainian]. URL: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/10447>

14. Bosyi, M.V. (2022). Thermodynamic energy efficiency of a geothermal heat pump on groundwater [Termodynamichna enerhoefektyvnist heothermalnoho teplovoho nasosa na hruntovykh vodakh]. Modern aspects of science: XX. Díl international kolektivní monografie / International Economic Institute s.r.o. Česká republika: Vědecká perspektiva. S. 556–568. URL: <http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/monography-20.pdf> [in Ukrainian]/
15. Bosyi, M.V. (2022). Heat pumps – an energy efficient regenerative ecologically clean source of heat [Teplovi nasosy – enerhoefektyvne vidnovlyuvalne ekolohichne chyste dzherelo teploty]. Moderní aspekty vědy: XXÍ Díl international kolektivní monografie International Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika: Vědecká perspektiva. P. 357380. [in Ukrainian]. URL: <http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/monography-21.pdf>
16. Morozyuk, T. V. (2006). Theory of refrigeration machines and heat pumps [Teoryya kholodynykh mashyn y teplovykh nasosov]. Odessa: Studio “Negotiant”. 712 p. [in Ukrainian]/
17. Tkachenko, S.Y., & Ostapenko, O.P. Steam compression heat pump installations in heat supply systems [Parokompresiyeni teplonasosni ustanovky v systemakh teplopostachannya]. Monograph. Vinnytsia: VNTU. 2009. 176 p. [in Ukrainian]
18. Arsenev, V. M., & Grechanenko, V. A. (2002). Exergetic evaluation of the efficiency of heat pump technology energy-saving [Ékserhetycheskaya otsenka éffektyvnosti teplonasosnoy tekhnolohyy énerhosberezhenyy]. *Bulletin of Sumy State University*. No. 9(42). P. 81-85. [in Ukrainian]
19. Bosiy, M.V., Kropivny, V.M., Kuzyk, O.V., Kropivna, A.V., & Molokost L.A. Thermodynamic energy efficiency of a vapor compression heat pump on groundwater [Termodynamichna enerhoefektyvnist parokompresiynoho teplovoho nasosa na hruntovykh vodakh]. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical sciences*. Kropyvnytskyi. 2022, issue 5(36), part I. S. 47–54 [in Ukrainian]. URL: http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/36_I.html
20. Bosyi, M.V., Kropivny, V.M., & Kuzyk, O.V. (2022). Thermodynamic study of the soil-water heat pump cycle for the space heating system [Termodynamichne doslidzhennya tsykladu teplovoho nasosu “hrunt-voda” dlya systemy opalennya prymishchennya]. *Visnyk of the Kremenchug National University named after M. Ostrogradskyi*. Kremenchuk: No. 1(132). P. 165–172 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.1.22>. URL: <http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/pravila.php>
21. Sirko, Z.S., Korenda, V.A., Vyshnyakov, I.Yu., Protasov, O.S., Okhrymenko, S.M., & Tsieren, N.L. (2020). The use of heat pumps for heating and hot water supply of enterprise buildings on the example of Helioterm installations [Vykorystannya teplovykh nasosiv dlya opalennya ta haryachoho vodopostachannya budivel pidpryemstv na prykladi ustanovok Helioterm]. *Scientific reports of NUBiP of Ukraine. Technology and energy of agricultural industry*. No. 5 (87) [in Ukrainian]/

22. Bosyi, M.V. (2022). The energy efficiency of an air heat pump based on an ecologically clean working medium of propane [Enerhetychna efektyvnist povitryanoho teplovoho nasosa na ekolohichno chystomu robochomu tili propani]. *Scientific notes of V.I. Vernadsky Tavrii National University. Series: Technical sciences*. Kyiv : Vol. 33 (72), No. 4. P. 144–148. [in Ukrainian]. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/22>. URL: <https://tech.vernadskyjournals.in.ua/33-72-4>
23. Bosyi, M.V. Lysenko, A.Ya., Manuylovich, V.V., & Panishko, O.V. (2021). Efficiency of the geothermal heat pump cycle [Efektyvnist tsykladu heotermalnogo teplovoho nasosu]. 5th International scientific and practical conference “Actual issues of modern science, society and education”. The 5th International scientific and practical conference “Topical issues of modern science, society and education” (November 28-30, 2021) SPC “*Sci-conf.com.ua*”. Kharkiv, Ukraine. 2101 p., p. 418–422. [in Ukrainian]. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/TOPICAL-ISSUES-OF-MODERN-SCIENCE-SOCIETY-AND-EDUCATION-28-30.11.21.pdf>
24. Bosyi, M.V. Lysenko, A.Ya., Manuylovich, V.V., & Barkar, M.M. Thermodynamic energy efficiency of geothermal heat pump “water-water” [Termodynamichna enerhoefektyvnist heotermalnogo teplovoho nasosa “voda-voda”]. The 3rd International scientific and practical conference “Modern science: innovations and prospects” (December 5–7, 2021) *SSPG Publish, Stockholm. Sweden*. 2021. 1036 p. ISBN 978-91-87224-02-7 [in Ukrainian]. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/MODERN-SCIENCE-INNOVATIONS-AND-PROSPECTS-5-7.12.21.pdf>
25. Bosyi, M.V., Lysenko, A.Ya., Manuylovich, A.V., Panishko, O.V., & Barkar, M.M (2022). Ground-water geothermal heat pump [Heotermalnyy teplovyy nasos “hrunt-voda”]. The 2nd International scientific and practical conference “Modern research in world science” (May 15–17.12.2022.). SPC “*Sci-conf.com.ua*”, Lviv. Ukraine. P.406-413. ISBN 978-966-8219-86-3. [in Ukrainian]. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/05/MODERN-RESEARCH-IN-WORLD-SCIENCE-15-17.05.22.pdf>

ВІДПОВІДНІСТЬ ТЕОРЕТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРІВ ТЕМПЕРАТУРИ І ПОТУЖНОСТІ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ

А.В. Рудик¹, В.М. Чуприна²

¹к.т.н., старший науковий співробітник відділу ППО,
Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння
та військової техніки, Чернігів, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-3582-9279

²д.т.н., провідний науковий співробітник відділу ОЛТЕХ,
Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння
та військової техніки, Чернігів, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-4886-090X

Анотація

Вступ. Шліфування поверхонь є ефективним методом фінішної обробки інструментом, що має переривчасту робочу поверхню. Процес шліфування супроводжується подрібненням стружки при нераціональній геометрії абразивних зерен. Це робить процес енергетично витратним. Теплові явища, що супроводжують процес, визначають експлуатаційні властивості поверхонь деталей. Теоретичним та експериментальним дослідженням процесу шліфування присвячені праці ряду вчених. Інтенсивність зміни температури шліфування часто пояснюють тепловими потоками. Різні методи експериментальних досліджень сигналів зміни температури за часом методів шліфування, та їх порівняння, доводять імпульсний характер дії джерел теплоти. Вочевидь, дією постійного теплового потоку це пояснити не можливо. Теоретично визначений ряд параметрів процесу шліфування, серед яких: розміри контакту; загальний час обробки, інтервали часу між дією сусідніх кромки; швидкість підведення припуску як для попутної так і зустрічної схеми шліфування; відсоток різальних кромки серед загальної кількості. Відмічені характерні моменти часу, що відповідають початку, закінченню процесу та досягненню теплового балансу. **Мета** – перевірка адекватності наведених теоретичних викладок в працях авторів, їх узагальнення, та порівняння з відомими експериментальними дослідженнями сигналів вимірювання температури та потужності процесу круглого поздовжнього та інших методів шліфування, проведених іноземними вченими для методів як при попутній, так і зустрічній кінематиці.

Результати. Проведений аналіз та розрахунки дозволили довести відповідність запропонованої теоретичної моделі та експериментальних даних теплових сигналів для методів процесу шліфування.

Висновки. Знайдені потужність, що припадає на різальну кромку, розподілення енергії, що відводиться зі стружкою та надходить в деталь. Оцінені фактори зміни потужності за час проходження області контакту.

Ключові слова: шліфування, теоретична модель, експеримент, температура, потужність, імпульсна дія, інтенсивність.

**CORRESPONDENCE OF THE THEORETICAL MODEL
AND THE RESULTS OF TEMPERATURE AND POWER MEASUREMENTS
OF THE GRINDING PROCESS**

A.V. Rudyk¹, V.M. Chupryna²

¹PhD, Senior Researcher

*of the Department of State Scientific Research Institute
of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-3582-9279*

² Doctor of Engineering, Lead Researcher of the Department OLTEX
*State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing
and Certification, Chernihiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-4886-090X*

Summary

Introduction. Surface grinding is an effective method of finishing with a tool that has a discontinuous working surface. The grinding process is accompanied by the grinding of chips with an irrational geometry of abrasive grains. This makes the process energy consuming. The thermal phenomena accompanying the process determine the operational properties of the parts' surfaces. The works of a number of scientists are devoted to theoretical and experimental studies of the grinding process. The intensity of the change in temperature and power of the grinding process is often explained by heat flows. Different methods of experimental studies of signals of temperature change over time for main grinding methods, and their comparison, prove the pulsed nature of the action of heat sources. Obviously, this cannot be explained by the action of a constant heat flow. A number of parameters of the grinding process are theoretically determined, including: contact dimensions; total processing time, time intervals between the action of adjacent edges; the speed of adding the allowance for both parallel and opposing grinding schemes; the percentage of cutting edges among the total number. Characteristic moments and time intervals corresponding to the beginning, end of the process and achievement of thermal balance are noted. **Purpose.** The article is devoted to the verification of the correspondence of the theoretical explanations given in the works of the authors, their generalization, and known experimental studies of the temperature and power measurement signals of the circular longitudinal process and other methods of grinding, carried out by foreign scientists for various methods, both with accompanying and opposite kinematics. **Results.** The conducted analysis and calculations made it possible to prove the correspondence of the proposed theoretical model and experimental data of thermal signals for methods of the grinding process. **Conclusions.** The power falling on the cutting edge, the energy distribution, which is removed with the chip and enters the part, are found. Estimated power change factors during the passage of the contact area.

Key words: grinding, theoretical model, experiment, temperature, power, impulse action, intensity.

Вступ. Шліфування поверхонь є ефективним методом фінішної обробки. Шліфувальний інструмент має переривчасту робочу поверхню. Під час процесу відбувається подрібнення стружки при нераціональній геометрії зерен. Це робить процес енергетично витратним.

Актуальність роботи. Теплові явища, що супроводжують процес визначають експлуатаційні властивості поверхонь деталей. Тому теоретичним та експериментальним дослідженням процесу шліфування присвячені праці ряду вчених.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Крім теоретичних напрацювань авторів роботи, існує значна кількість експериментальних досліджень різних методів шліфування проведених як вітчизняними, так і закордонними вченими [1–4]. В роботі С.М.Корчака температуру вперше [1] розглядають як результат сумарної дії теплових імпульсів, інтенсивність і кількість яких залежить від характеристик круга, заготовки, режиму різання. Враховано вплив температури поверхневих шарів на зміну опору пластичному деформуванню, а тому, на інтенсивність тепловиділень. Роботи [2; 3] присвячені термомеханічному підходу до процесів обробки. Кінематичний ефект швидкісного шліфування досліджений в роботі [4]. Проф. Криворучко Д. В. [5] виникнення теплоти пояснює наслідком адиабатичного стиснення. Побудовані складні математичні моделі [5; 6], що обмежує їх практичне використання. В роботі Смірнова В.А. [7] врахований імпульсний характер дії теплоти. Автор пропонує теплоту вважати такою, що складається з рівномірно розподіленої та імпульсної частин.

В попередніх роботах авторів [8; 9] в якості вхідних для розрахунків теплових явищ прийняті: витрачена потужність, стан робочої поверхні круга (РПК), величина припуску t , кінематика, що крім швидкості шліфування $V_{кр}$ описує проекцію на нормаль відносного руху V_d кругової подачі деталі ω_d (або поступальної стола $V_{ст}$); радіуси $R=D/2$, r круга та деталі. Врахований відносний напрям швидкостей подачі та різання: зустрічна чи попутна обробка. Теоретично визначені кутові розміри θ_n круга та довжину контакту:

$$\theta_n = \sqrt{\frac{2 \cdot t \cdot r}{R \cdot (R + r)}}, \quad L_k = R \cdot \theta_n. \quad (1)$$

Звідси, загальний час обробки визначають різницею між кінцевим та початковими моментами часу $T_o = \tau_k - \tau_0$, або відношенням довжини контакту до швидкості руху подачі

$$T_o = L_k / V_o \quad (2)$$

Проекція швидкості підведення припуску на напрям нормалі до поверхні круга $V_{n,max} = V_n(\theta_n)$, як локальний показник інтенсивності процесу за рахунок суми поступального та обертового рухів подачі у функції центрального кута $\theta_0 \leq \theta \leq \theta_n$ інструмента в межах контакту:

$$V_{n,поз} = \omega_d \cdot (R + r)(\theta_2 - \theta_1) + n_d \cdot S_0 \cdot \alpha, \quad (3)$$

де $V_o = \omega_o \cdot r$ – швидкість кругової подачі деталі.

Локальний показник проекції на нормаль відносного руху подачі V_n краще ніж усереднений питомої продуктивності, який широко використовують для опису інтенсивності процесу. Проекція швидкості відносного руху подачі на нормаль V_n до поверхні інструмента знаходиться в межах $0 \leq V_n(\theta_n) \leq V_{n,max}$. Максимальне значення $V_{n,max} = V_n(\theta_n)$ визначають крайнім (або більшим кутовим розміром) для умов як зустрічного, так і попутного шліфування.

Для процесу шліфування (фрезерування) розрізняють *попутну та зустрічну обробку* – теплова напруженість та стійкість яких відрізняються, та є кращими для попутної схеми, коли підведення припуску зменшується до нуля за кутом повороту інструмента [8; 9]. Глибину проникнення кромки за час $d\tau$ повороту деталі на кут контакту. $d\tau = d\phi / \omega_\phi$ для *зустрічної* схеми різання визначають:

$$z^{звч}(\phi_1) = \int_0^{\tau_1} V_n d\tau = \int_0^{\phi_1} \left[\omega_\phi \cdot (R+r) \cdot \left(\frac{r}{R} \cdot \phi \right) \right] \frac{d\phi}{\omega_\phi} = (R+r) \cdot \frac{r}{R} \cdot \frac{\phi_1^2}{2} \quad (4з)$$

Для *попутної* обробки змінюється напрям обертання деталі, тому границі інтегрування:

$$z^{non}(\phi_1) = \int_{(\phi_n - \phi_1)}^{\phi_n} V_n d\phi = (R+r) \cdot \frac{r}{2 \cdot R} \cdot [2 \cdot \phi_n \cdot \phi_1 - \phi_1^2] \quad (4п)$$

Товщину зрізу знаходять через ймовірність контакту [8] кромки з припуском. Згідно закону Пуассона, який вірний для одинарних (що відбуваються по одинці) процесів появи подій, ймовірність визначають:

$$P_0(\tau) = e^{-\tau_k \cdot v_{кр} \cdot \int_0^{\tau_k} N(x(\tau)) \cdot d\tau} \quad (5)$$

де $P_0(\tau)$ – ймовірність відсутності контакту кромки з металом на протязі часу τ , $\frac{\partial P_0(\tau)}{\partial \tau} d\tau$ – елемент ймовірності, $N(z)$ – питома кількість кромок РПК в межах деякої висоти z РПК висотою профілю H_n [4; 8], $x(\tau) = V_n \cdot m_{\Delta\tau} / H_n$ z – відносне заглиблення вглиб РПК. Інтервали часу $m_{\Delta\tau}$ між контактами кромки з припуском знаходять через елемент ймовірності як математичне сподівання.

$$m_{\Delta\tau}(\tau_k) = \int_0^{\tau_k} \tau \cdot \frac{\partial P_0(\tau)}{\partial \tau} d\tau, \quad (6)$$

Відсоток різальних кромки серед загальної кількості за час проходження області контакту представлений на рис. 1:

$$\%_p(\tau) = 100 * \left(1 - \frac{pbeta_\tau(\tau)}{pbeta_\tau(\tau_k)} \right), \quad \%_{pиз} = \%_p(\tau_R). \quad (7)$$

де моменти часу: біжучий τ , переходу до процесу різання τ_R та кінцевий τ_k ; $pbeta(\tau)$ – інтегральна функція бета розподілення зміни інтервалу часу впродовж від початкового τ_0 до біжучого моменту τ .

Зміну за часом τ_1 проходження області контакту інтегральної функції відсотка різальних кромки $F\%$ щодо їх загальної кількості показаний на рисунку 1. Даний приклад розрахований для режимних параметрів [4; 8]: круг марки 25СМ1 після правки, швидкості різання та подачі відповідно $V_{кр} = 50$ м/с; $V_d = V_{кр}/60$; глибина $t = 0,05$ мм.

Відмітимо вплив проекції швидкості V_n на усі розглянуті параметри.

Мета – це перевірка відповідності теоретичних залежностей, наведених в працях авторів [8; 9], та експериментальних досліджень теплової напруженості методів процесу шліфування проведених іноземними вченими [7; 10; 11].

Мету можна досягнути шляхом виконання *завдань дослідження*.

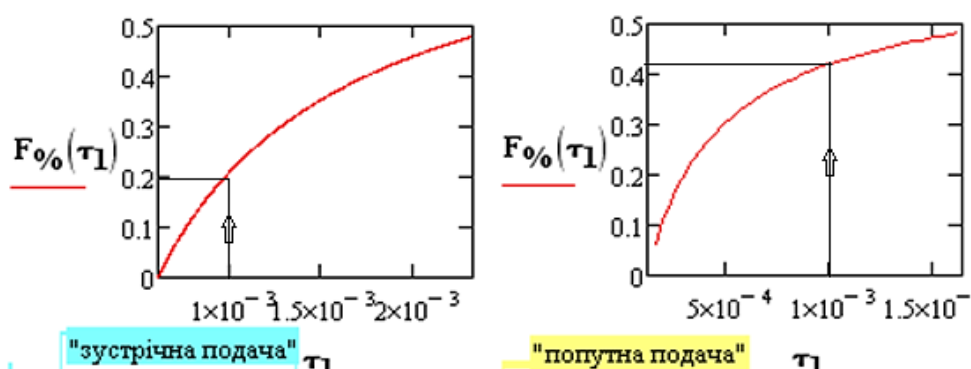


Рис. 1. Зміна за часом τ_1 відсотка різальних кромок для зустрічного та попутного шліфування

Дослідити дослідні графіки зміни температури процесів шліфування, виділити на них характерні точки, як то τ_0 початку, τ_k закінчення та τ_B досягнення теплового балансу та характерних відповідних інтервалів.

Дослідити вплив проекції швидкості відносної подачі V_n на температуру протікання процесу шліфування.

Результати. Графіки вимірювання температури процесу шліфування [7; 10; 11] (рис. 3) доводять імпульсний характер дії теплових джерел та дозволяють порівнювати методи вимірювання. Досліди дозволяють визначити характерні моменти й інтервали часу між контактами. Можна знайти співвідношення між кількістю кромок як на початку різання, так і при виході з контакту.

Розглянемо декілька прикладів.

1. В роботі Смірнова В.А. [7] для круглого поздовжнього шліфування досліджувався характер теплових виділень за допомогою термопар отриманий експериментом тепловий сигнал [7]. Однак не наведені усі потрібні данні. Так, не вказані значення радіусів деталі та круга, стан РПК. За виміряним часом контакту данні визначені розрахунком [8]. Умови досліду (рисунок 2,а), вказані у другому стовпчику таблиці. Відмітимо імпульсну дію теплових джерел та задовільний збіг теоретичних та дослідних даних.

2. Урізне шліфування можна розглядати як ефективний різновид (3) круглого [2–4], де урізання відбувається по спіралі Архімеда із параметром, що дорівнює $t = \frac{S_{non}}{n_\phi}$. Ефективність методу пояснюється додатковою спрямованою радіально

складовою нормальної швидкості S_{non} та значним збільшенням розмірів контакту.

3. В роботі англomовних вчених Ху Хіпенга та Стіва Малкіна [10] (рис. 2,б) та (рис. 3–5) були експериментально отримані та порівняні між собою теплові сигнали від природної, штучної термопар та інфрачервоного датчика для умов дослідів при плоскому попутному шліфуванні призматичного бруска без використання МОР.

Детальні умови досліду наведені у третьому стовпчику таблиці. Основні теоретичні залежності залишаються подібними, вважаючи радіус деталі $r \rightarrow \infty$. Стан

РПК для оцінки параметрів зрізу прийнято подібним до використаного [4] ельборового круга із урахуванням даних роботи [10].

Як для вбудованих терпари так і для фотоелемента, реальну глибину знаходження датчиків, що впливала на значення температури, у кожному експерименті розраховували числом проходів до закінчення шліфування. Сигнали подавали в комп'ютер через фільтр низьких частот і аналого-цифровий перетворювач.

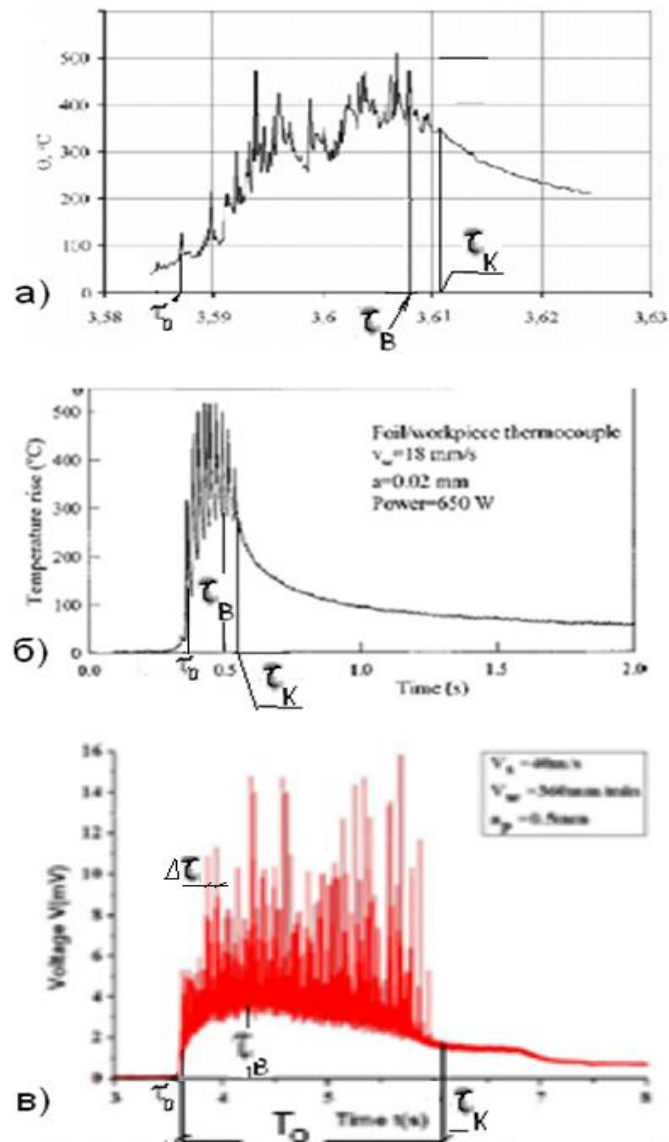


Рис. 2. Результати вимірювання температури методів шліфування:
а) круглого поздовжнього [7]; б) попутного плоского [10]; в) плоского [11]

Режимні параметри	Метод обробки, дослідники		
	Поздовжнє	Плоске	
	Смірнов В.А. [7]	Ху Хіпенг, Стів Малкін [10]	китайські вчені [11]
Шліфувальний круг D×H	Ø550*(орієнтовно), 25 СМ1	КНБ, Ø406×12.5 зернист. 91, 100%	КНБ, Ø400×10
Заготовка	вуглецева сталь 9ХС	вуглецева сталь НВ 88	Нікелевий сплав Inconel 718
Розміри заготовки: Висота *Ш*Д	поверхня обер- тання Ø180	Н×W×L= = 25×19×44	Н×W×L= = 60×5×50
Припуск, t, мм	0,01	0,02	0,5
Кутові розміри контакту: $\theta_n = L_k / R$			
розрахована довжина L_k	1,65	2,85	14,15 мм
Швидкість			
різання $V_{кр}$ м/с	35*	58	40 (130÷30)
заготовки V_d мм/с	50*	18	360/60
нормальна V_n 1000* V_{nMAX} мкм/с	417	253	4243
Знайдені з рисунку 3 моменти та інтервали часу, с			
початковий момент τ_0	3,583	0,3	3,55
Час τ_B досягнення теплового балансу	3,607	0,5	4,3
момент закінчення різання τ_k	3,612	0,6	6,05
Інтервали часу, с			
Вимірний час $T_0 = \tau_k - \tau_0$	0,026	0,15	2,5
Розрахований час $T_0^* = L_k / V_d$	0,025	0,158	2,36
Між тепловими імпульсами	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,67 \cdot 10^{-4}$	$2,42 \cdot 10^{-4}$
Потужність процесу, Вт	-	650	1050

Усі теплові сигнали, отримані різними експериментальними методами (рис. 2,б), мають порівнянні результати та імпульсний характер дії джерел.

При ідентичних умовах шліфування поверхні без використання МОР, кругом із кубічного нітриду бору були зіставлені три названі методи вимірювання температури.

На рис. 3 показані схема установки вимірювання температури та потужності; результати вимірювання температури (рис.4) вбудованою термopарою (а), інфрачервоним датчиком (б) і термopарою із фольги у заготовці (в). Результати вимірювання температури можна порівняти із аналітичними розрахунками по інтенсивності процесу шліфування.

Усі методи, при плоскому шліфуванні, показали порівнянні результати.

Термопара із фольги у заготовці також реєструвала періодичні піки миттєвої температури при обертанні шліфувального круга. Інфрачервоні вимірювання показували піки більш низької інтенсивності, ніж ті що виникають на тій же частоті. Як було запропоновано раніше, миттєва температура може бути пов'язана із різанням окремими зернами шліфувального круга [2]. Отже, фізична природа піків, які спостерігають, не відома і вимагає подальших досліджень. Даний експеримент не пояснює чим викликані як стрімкі піки температури, так і її зниження.

На рис.4,а та 4,б відмічено кольором зменшення температури процесу по проходах (при зменшенні глибини), або від інтенсивності V_n . Отже, досліді доводять значний вплив проекції V_n швидкості відносного руху подачі на температуру.

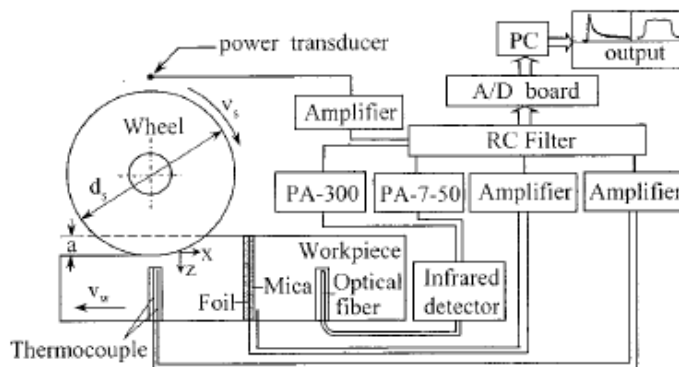


Рис. 3. Схема установки вимірювання температури та потужності шліфування [10]

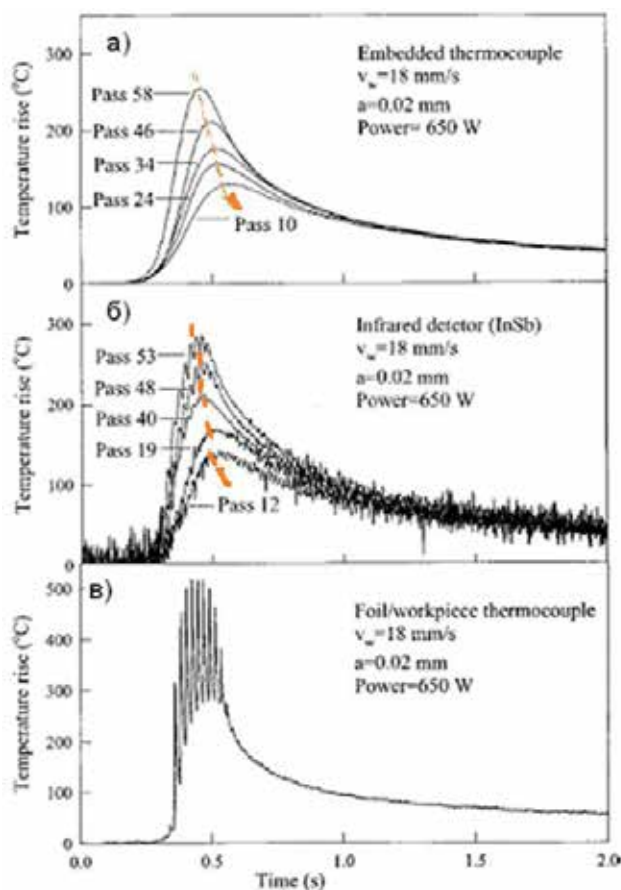


Рис. 4 – вимірювання температури трьома методами [10]

Одночасно з температурою вимірювали потужність шліфування.

Середнє значення сталої потужності процесу шліфування, рівне 650 Вт, було отримано із урахуванням втрат холостого ходу (рис. 5). Це значення перевірено чисельними паралельними дослідями при однакових умовах режимів шліфування. Значення потужності, що припадає на одну кромку для умов шліфування периферією круга, визначають по площі контакту $S(\tau) = W \cdot \theta(\tau) \cdot R$.

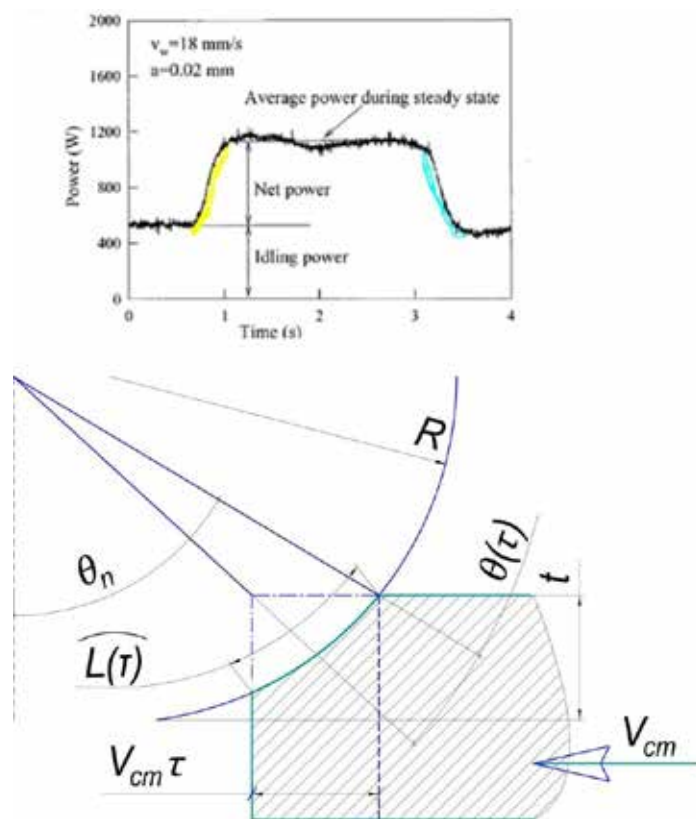


Рис. 5. Зміна потужності [11] та схема знаходження кількості теплових імпульсів для моментів врізання, сталого процесу та виходу із контакту

Для інтервалів τ часу врізання (виділений жовтим кольором), сталого процесу та виходу із контакту (виділений синім), отримують (рис. 5,а):

$$S(\tau) = W \cdot R \cdot \theta(\tau) = W \cdot R \cdot \begin{cases} \tau \cdot V_{cm} / R \\ \theta_n \\ (\theta_n - \tau \cdot V_{cm} / R) \end{cases} \quad (8)$$

де W – ширина заготовки, $\theta(\tau)$ – кутовий розмір контакту для деякого моменту τ часу, враховуючи врізання, сталий процес різання та вихід круга з контакту із заготовкою.

Із урахуванням умов досліду (рисунок 5,а. та відомої висоти H_n профілю РПК) знаходять кількість кромок, що контактують на протязі l с у деякий момент часу τ :

$$n_{\text{конт}}(\tau) \approx (v_{\text{кр}} \cdot 10^3) \cdot S(\tau) \cdot \left[N_s \left(\frac{V n_{\text{max}} \cdot m_{\tau}}{H_n} \right) \right], \quad (9)$$

де $N_s \left(\frac{V n_{\text{max}} \cdot m_{\tau}}{H_n} \right)$ питома кількість кромок на мм^2 та відносному заглибленні, що

викликане нормальною швидкістю V_n [4; 10].

Для сталих умов процесу шліфування кутовий розмір, який обмежений границями контакту, має постійне значення $\theta(\tau) = \text{const}$. Тому площа контакту $S(\tau) = \text{const}$, кількість кромок, що проникають вглиб припуску та приймають участь у деформації металу й різанні, також не змінні.

Під час врзання та вибігу майже лінійно змінюється кут $\theta(\tau)$, що викликає відповідну зміну дослідної залежності вимірної потужності на рисунку 5,а. Як видно з графіку зміни потужності за часом обробки $N_{\Sigma}(\tau)$, та проведених у роботі чисельних дослідів ці данні добре корелюють.

Рисунок дозволяє через миттєву потужність N_{Σ} дії усіх кромок знайти кількість теплових імпульсів, що знаходяться у зоні контакту, та оцінити значення теплового імпульсу однієї кромки. Отже, отримують:

$$N_1(\tau) = \frac{N_{\Sigma}}{n_{\text{конт}}(\tau)}, \quad (10)$$

Для умов досліду $N_{\Sigma} / H = 650 / 12,5 = 52 \text{ Bm}$, $\theta_n = \sqrt{2t / R} \approx 0.0141$ тут N_{Σ} / H – питома потужність процесу шліфування, що припадає на 1 мм висоти круга. Питому кількість кромок, що припадає на одиницю площі контакту (мм^2), та приймає участь у процесі визначають по глибині розташування, меншій від рівня проникнення.

Для подібної РПК [10], описаної з дослідів методом дряпання похилої площинки інструментом у стані РПК круга ЛД20К після правлення питому кількість кромок на одиницю площі для глибини проникнення, визначену через нормальну швидкість при математичному сподіванні імовірного інтервалу між контактами $m_{\Delta\tau} = 1.2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ знаходять $V n_{\text{max}} / H_n = 1000 \cdot V_c \cdot \theta_n / H_n = 1000 \cdot 18 \cdot 0.0141 / 178 \approx 1.43$.

Умову теплового балансу спостерігають в момент часу τ_B , коли кількість теплоти, що надходить в зону різання від деформацій кромками дорівнює тій, що відбирається різальними кромками.

$$n_{\text{різ}} \cdot \Phi_{\text{стр.утв}} \approx n_{\text{конт}} \cdot \Phi_{\text{з.п}} \quad (11)$$

де $\Phi_{\text{стр.утв}}$, та $\Phi_{\text{з.п}}$ – кількість теплоти, що виділяється кромкою, що контактує, у площині стружка утворення та на задній поверхні (рис.4).

Однак, співвідношення між кількостями теплоти не наведені.

Враховуючи, що $n_{\text{різ}} / n_{\text{конт}} \approx \%_{\text{різ}}$, отримують

$$\Phi_{\text{з.п}} \approx \%_{\text{різ}} \cdot \Phi_{\text{стр.утв}} \quad (12)$$

утворення теплоти [4; 10] навколо різальної кромки інструмента.

4. В роботі китайських вчених [11] наведені отримані типові графіки температури процесу, питомої енергії, розподілення теплового балансу у функції швидкості під час глибинного шліфування сплаву Inconel 718.

Шліфування здійснювали кругами із СВН при наявності охолодження на основі водного розчину. Режимні параметри: швидкість різання 40–130 м/с, глибина різання 0,5 мм, подача 360 мм/хв. внесені до 5 стовпчику таблиці та на рисунок 6, який свідчить про чітко виражений імпульсний характер дії сигналу та поступове зниження температури у момент після теплового насичення.

Вимірювання температури проводили напівприродною термопарою.

Table 1 Conditions for grinding tests

Wheel speed v_s	Workpiece speed v_w	Depth of cut a_p	Wheel diameter d_s	Wheel width b
30–130m/s	360mm/min	0.5mm	400mm	10mm
Grinding mode	Dressing tool	Dressing parameter	Coolant type	Coolant pressure
Down-grinding	Diamond Plate wheel	Ud1 ^[4]	water-based coolant	13–15bar

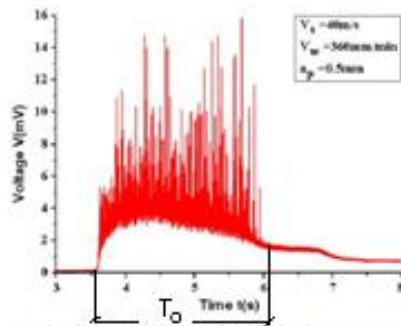


Fig.1 Typical temperature signal during creep feed grinding.

Рис. 6. Сигнал температури та режимні параметри плоского шліфування зі швидкістю 40 м/с [11]

Отримані графіки (рис. 7) зміни питомої енергії та теплового балансу.

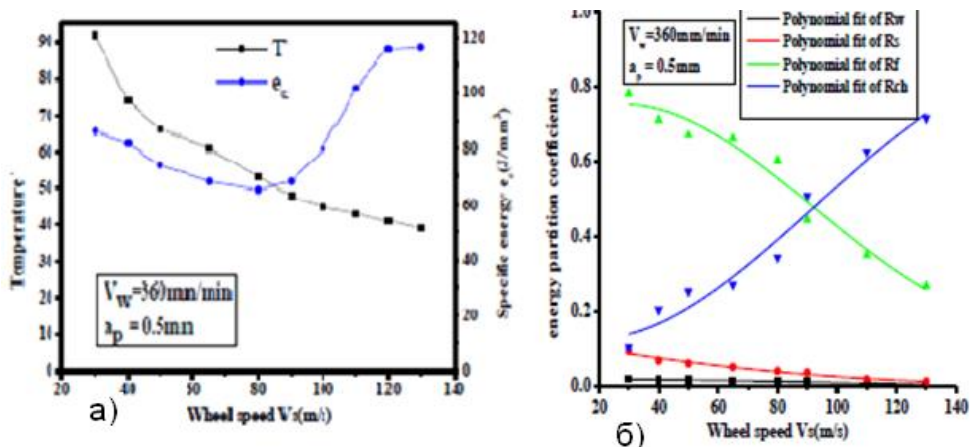


Рис. 7. Зміна температури заготовки, питомої енергії (а) та теплового балансу (б) у функції швидкості шліфування [11]

Під час збільшення швидкості шліфування нікелевого сплаву значна частина енергії відводиться зі стружкою R_{ch} та охолоджувальною рідиною МОР R_f . Інша частина тепла потрапляє у заготовку R_w і круг R_s – скорочується. Це зменшує температуру як заготовки, так і зерен круга з матеріалу CBN, який має значну вартість порівняно з іншим абразивним матеріалом.

Дослідами визначена питома енергія e_c зрізання одиниці об'єму сплаву для швидкості $V_k=40$ м/с. Звідси можна визначити потужність, яку потребує процес шліфування (без урахування ККД приводу):

$$N = e_c \cdot V_w \cdot a_p \cdot W = 70 \cdot \frac{360}{60} \cdot 0,5 \cdot 5 \approx 1.050 \text{ кВт}. \quad (13)$$

Авторами проведені дослідні одночасного вимірювання температури та потужності процесу торцевого шліфування двох торців на верстаті моделі 3342 АДО [9]. Досліди свідчать про імпульсний характер дії джерел тепла на торцеву поверхню деталі. Вимірювання потужності дозволяє визначити енергетичну напруженість за кутом β повороту барабану подачі верстату. Для досягнення кращої точності обробки кути орієнтації γ та ν шліфувальних бабок верстату були пов'язані співвідношенням $\nu = \gamma / 1,57$.

Результати досліджень. Дослідження запропонованих теоретичних залежностей свідчать про імпульсний характер та можливість використовувати залежності для різних методів шліфування, включно з обробкою торцевої поверхні деталі. Інтенсивність процесу шліфування впливає не лише на температуру, а й на точність обробки [9].

Наведені в таблиці параметри задовільно збігаються за результатом розрахунку та тими, що виміряні дослідним шляхом. Деяким виключенням з правила є різні інтервали між імпульсами, що спостерігають. Пояснити це можна малим відсотком різальних кромки. Решта кромки виконує роботу видавлювання метала. Питомий показник інтенсивності процесу, нормальна швидкість, використаний для описання теплової напруженості дослідних сигналів. Іншою причиною деяких розбіжностей результатів є використана в роботі модель робочого профілю круга, отримана іншим автором [10].

Запропоновані ввести моменти часу, що відповідають за початок та закінчення контакту, досягнення температурного балансу та відсоток різальних кромки серед загального числа.

Висновки. Проведені розрахунки дозволили довести адекватність запропонованої теоретичної моделі та отриманих експериментальних сигналів, проведених вченими [7; 10; 11] для різних методів шліфування та оцінити теплову та енергетичну напруженість процесу шліфування. Знайдені потужність, що припадає на різальну кромку, розподілення енергії, що відводиться зі стружкою та потрапляє в деталь. Оцінені фактори зміни потужності за час проходження області контакту. Вочевидь, дією постійного теплового потоку коливання температури пояснити не можливо. На нашу думку – теплота з поверхні деталі відводиться різальними кромками, а додається тими, що лише деформують метал. Співвідношення між цими тепловими потоками залежить від відсотка різальних кромки серед їх загальної кількості.

Створена математична модель здатна проводити розрахунки для різноманітної кінематики поздовжнього та торцевого шліфування. Вона враховує вплив на температуру, товщину зрізу, часу між контактами, зерен.

Досліди доводять значний вплив на зменшення температури процесу по проходах (зменшення глибини. проекції Vn швидкості відносного руху.

ЛІТЕРАТУРА

1. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М. : М-е, 1974, 280 с.
2. Верещака А.С., В.С.Кушнер. Резание материалов : монография. М. : Высшая школа, 2009, 536 с.
3. David A. Stefenon, John S. Agapion. Metal Cutting Theory and Practice. *CRC Press New York*. 2016. 932 с.
4. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование : монография. Л. : Машиностроение, 1979, 248 с.
5. Криворучко Д.В., Залого В.О., Корбач В.Г. Основы 3D-моделирования процесів механічної обробки методом скінченних елементів : монографія. Суми : СумДУ, 2009, 208 с.
6. Aurich I.C., Biermann A.D., Blum E.H. Modeling and simulation of process machine iteration in grinding. *Production Engineering Research and Development*, 2009. 3. P. 111–120.
7. Смирнов В.А. Решение тепловой задачи при шлифовании с учетом импульсного характера теплового потока. *Известия Томского политехнического университета*, 2011. Т. 319. № 2. С. 46–49.
8. Рудик А.В., Пасов Г.В. Залежність параметрів зрізів від режимів при зустрічному та попутному шліфуванні. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського*. Т. 30 (69) № 7, 2019. С. 712.
9. A.V.Rudyk, V. M. Chupryna, V.A. Rudyk. Effect of shape formation on the accuracy of grinding ends while compensating for machine tool errors/ *EEJET*, № 2/1 (110), 2021, p. 90–97. DOI: 10.155871729-4061.2021226479.
10. Сравнение методов измерения температуры шлифования Khu Khipeng, Stiven Malkin. URL: <https://www.km.ru/referats/334607-sravnenie-metodov-izmereniya-temperatury-shlifovaniya>
11. PING Bo, FU Yucana, ZHANG Zhiwei and ZHAO Zhengcai. Effect of Grinding Speed on Energy Partition for Grinding of Inconel 718 with Vitrified CBN Wheels. *Advances in Materials Manufacturing Science and Technology XV*, Materials Science Forum. Vol. 770. P. 263–270.

REFERENCES

1. Korchak S.N. (1974) The grinding process productivity of steel parts – M. Engineering, 280 p.
2. Vereschaka A.S., Kushner V.S. (2009). Cutting materials. M. : High school. 536 p.
3. David A. Stefenon, John S. (2016). Agapion. Metal Cutting Theory and Practice. *CRC Press New York*. 932 p.
4. Filimonov L.N. (1979). High-speed grinding. L. : Mashinostroenie, 248 p.

5. Kryvoruchko D.V., Zaloga V.O., Korbach V.G. (2009). Fundamentals of 3D-machining processes modeling by finite element method. Sumy : SumSU, 208 p.
6. Aurich I.C., Biermann A.D., Blum E.H. (2009). Modeling and simulation of process machine iteration in grinding. *Production Engineering Research and Development*. V. 3. Pp. 111–120.
7. Smirnov V.A. (2011). Solving the heat problem during Grinding, taking into account the pulsed nature of the heat flow. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, V. 319, No. 2, pp. 46–49.
8. Rudik A.V., Pasov G.V. (2019). Dependence of the section parameters on the modes of counter and back grinding. *Scientific notes of the VI Tavrida National University Vernadsky*. Volume 30 (69) No. 7. Pp. 7–12.
9. A.V.Rudyk, V. M. Chupryna, V.A. Rudyk. (2021) Effect of shape formation on the accuracy of grinding ends while compensating for machine tool errors. *EEJET*. № 2/1 (110), pp. 90–97. DOI: 10.15587/1729-4061.2021226479.
10. Hu Hipeng Comparison methods for measuring the grinding temperature. Hu Hipeng, Stephen Malkin URL: <https://www.km.ru/referats/334607-sravnienie-metodov-izmereniya-temperatury-shlifovaniya>.
11. PING Bo, FU Yucana, ZHANG Zhiwei, ZHAO Zhengcai. (2013). Effect of Grinding Speed on Energy Partition for Grinding of Inconel 718 with Vitrified CBN Wheels. *Advances in Materials Manufacturing Science and Technology XV, Materials Science Forum* Vol. 770. Pp. 263–270.

РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.431.74

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.08>

ВИКОРИСТАННЯ ЧИСЛОВИХ ПРОФІЛІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СУДНОВОГО МАЛООБЕРТОВОГО ДВИГУНА НА РЕЖИМАХ ЧАСТКОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ

М.Є. Рибальченко¹, Є.В. Білоусов²

¹аспірант кафедри експлуатації суднових енергетичних установок
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна
ORCID ID: 0000-0003-3533-3967

²д.т.н., професор, професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна
ORCID ID: 0000-0001-8185-8209

Анотація

Вступ. Сучасний стан розвитку суднових двигунів внутрішнього згорання вимагає дотримання жорстких вимог за цілим рядом як економічних так і екологічних показників, дотримання яких можливо тільки за умов перебування двигунів у справному стані. Визначення і підтримання робочого стану двигуна є тією основною задачею яку вирішують судові механіки під час експлуатації. Ефективне визначення стану ґрунтується на порівнянні текучих параметрів стану або характеру процесів, що видобуваються у робочому просторі двигуна, з еталонними значеннями або кривими, що характеризують перебіг процесів.

Ціль роботи. Враховуючи значні зміни у логістичній системі сучасного судноплавства та зростанням екологічних вимог, нагальною є потреба у визначенні еталонних параметрів робочого процесу на режимах часткових навантажень двигуна, для проведення діагностичних процедур під час експлуатації судна на визначеному ходовому режимі. Саме вирішенню цих питань присвячене це дослідження.

Основна частина. За допомогою методології створення цифрового профілю робочого процесу суднового малообертового двигуна, оснований на апроксимації базових діаграм отриманих під час його стендових випробувань, визначається набір числових масивів, що відповідають індикаторним діаграмам двигуна у всьому діапазоні режимів роботи, з кроком в 1 % по навантаженню.

Розроблений авторами розрахунковий комплекс дозволяє експортувати до нього масиви даних для неспіціфікаційних режимів як у вигляді еталонних діаграм, так і даних отриманих у результаті індиціювання двигуна під час його експлуатації. За результатами обробки масивів розрахунковий комплекс формує набір діаграм робочого процесу у $r\phi$ та rV -координатах, а також діаграм які характеризують динамічність робочого процесу та процесу тепловиділення. Обробка

даних діаграм дозволяє визначити розширений, у порівнянні з іншими аналогічними комплексами, набір параметрів, що характеризують перебіг робочого процесу.

Висновки. Розроблена методологія дозволяє забезпечити процес діагностування двигуна за параметрами робочого процесу базою для порівняння фактичних показників з розрахунковими еталонними, у всьому діапазоні робочих режимів двигуна.

Ключові слова: судновий малообертовий двигун, індичіювання, індикаторна діаграма, 3D-поверхня робочих режимів.

USAGE OF NUMERICAL PROFILES OF THE WORK PROCESS TO ANALYZE THE EFFICIENCY OF THE LOW-SPEED MARINE ENGINE AT PARTIAL LOADS

M.Y. Rybalchenko¹, I.V. Bilousov²

¹Postgraduate student of the Department "Operation of Ship Power Plants"

Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-3533-3967

²PhD (Engineering), Professor,

Professor at the Department Operation of Ship Power Plants,

Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine

ORCID ID: 0000-0001-8185-8209

Summary

Introduction. The current state of development of marine internal combustion engines demands compliance with strict requirements for a number of economic and environmental characteristics, compliance with which is possible only if the engines are in good condition. The main task that vessels engineers solve during routine operation is examination and support of the engine condition in good order. Effective determination is based on a comparison of the current parameters of the processes in the engine's working space with reference values or curves which are characterizing the course of the processes.

Purpose. Taking into account the significant changes in the logistics systems of modern shipping and the growth of environmental requirements, the main thing is the necessity for defined reference parameters of the work process at partial engine load modes, for carrying out diagnostic procedures during the vessel's operation at the specified operating mode. This research is devoted to the solution of these questions.

Results. Using the methodology of creating a digital profile of the working process of a low-speed marine engine, based on the approximation of the basic diagrams obtained during its bench tests, a set of numerical arrays corresponding to the indicator diagrams of the engine is determined on the whole range of operating modes with a step of 1% depending on the load. The calculation complex developed by the authors allows you to export to it data's arrays for non-specification modes both: in the form of reference diagrams and in the form of data obtained as a result of engine indication during its operation. Based on the results of array processing, the calculation complex forms a set of diagrams of the work process in $p\phi$ - and pV -coordinates, as well as diagrams characterizing the dynamics of the work process and the process of heat generation. The processing of these diagrams allows you to define a set of parameters that characterize

the course of the work process, which is expanded in comparison with other similar complexes.

Conclusions. *The developed methodology makes it possible to provide the process of engine diagnostics according to the parameters of the work process, by a basis for comparing actual indicators with calculated reference ones in all areas of engine operating modes.*

Key words: *low-speed marine engine, indication, indicator diagram, 3D surface of operating modes.*

Вступ

Безпека експлуатації суден значною мірою визначається правильністю використання та діагностики їх енергетичних установок. Головний двигун та його допоміжні системи на борту суден працюють у важких умовах, що істотно змінює їх характеристики та може викликати підвищений знос, відмови в роботі та, в деяких випадках, навіть спричинити аварію. Моніторинг стану ДВЗ є одним із шляхів покращення ефективності технічного обслуговування, ремонту та збільшення експлуатаційної надійності суднових дизелів, допомагає передбачити та уникнути багатьох поломок його елементів.

Критерієм справної роботи двигуна є відповідність його показників енергетичним, екологічним та експлуатаційним параметрам встановленим заводом-виробником, що забезпечується правильним перебігом робочого процесу. Тому індикюванню, як одному з основних видів діагностики суднових двигунів приділяють прискіпливу увагу під час їх експлуатації.

Актуальність теми

З 2007 року судноплавні компанії які займалися контейнерними перевезеннями почали впроваджувати режими повільного руху (slow steaming) суден, зменшивши їх комерційну швидкість з 22...25 вузлів до 18 вузлів або навіть менш (super slow steaming – 15 вузлів) [1; 2]. Першочерговим поштовхом для запровадження режимів slow steaming стала необхідність економії палива в період, коли ціна на бункерування швидко зростала з \$150...200 до \$600...750 за тону. Наприклад, в січні 2007 року вартість палива за тону IFO380 у Роттердамі зросла з \$220 до піку понад \$700 в середині липня 2008 року [3]. У подальшому ціни суттєво коливалися залишаючись на рівні \$700...800 по теперішній час.

Зараз концепція повільного руху, попередньо впроваджена на контейнеровогах, запозичена іншими компаніями – операторами інших типів суден, включаючи танкери та суховантажні судна, робочі швидкості яких і так традиційно низькі.

Більш того, сучасні судноплавні компанії вимагають підтримувати швидкість незмінною на протязі всього рейсу, оскільки рух з постійною швидкістю призводить до значно меншої витрати палива (приблизно на 15...25%), ніж аналогічний рух з різними швидкісними режимами на окремих ділянках рейсу, навіть коли середня швидкість суден може бути однаковою.

Ще одним фактором який останнім часом впливає на тенденцію зменшення швидкості суден є зростання вимог щодо зменшення шкідливих викидів з відпрацьованими газами двигунів. Так згідно Міжнародної конвенції щодо запобігання забрудненню атмосфери з суден [4] оксидами азоту (NO_x), загальні питомі викиди

останніх, сучасними малооберттовими двигунами, не повинні перевищувати 3,4 г/(кВт×год.).

Так, через причини описані вище, компанія MAERSK (штаб квартира м. Копенгаген, Данія), що є провідним оператором з контейнерних перевезень, знизила середнє навантаження головних двигунів суден задіяних на трансокеанічних лініях приблизно з 57% до 35% від номінальної потужності, [5]. Аналогічні висновки можна зробити і з власного досвіду автора. Аналіз швидкісних режимів суден на яких йому довелося працювати у період з 2016 по 2020 роки на посаді старшого механіка, показує наступне: частина ходового часу з навантаженням більше 50% від номінальної потужності головного двигуна займала не більше 13% загального часу роботи.

Вищезазначені тенденції в організації перевезень унеможливають задовільну оцінку технічного стану малооберттових головних двигунів шляхом зняття індикаторних діаграм їх робочого процесу, оскільки це потребує виведення його на режим роботи максимально наближений до номінального на досить тривалий час.

Формулювання мети дослідження

Виходячи в наведеного аналізу слідує, що на теперішній час є нагальна проблема оцінки параметрів робочого процесу двигун на режимах відмінних від номінальних, яка може бути вирішена шляхом створення цифрових профілів у вигляді 3D-поверхонь, що пов'язують між собою кут оберту колінчатого валу, тиск у робочому циліндрі і навантаження двигуна. Ці профілі, можуть бути використані для оцінки ефективності роботи двигуна на будь-якому режимі навантаження, а також для визначення його технічного стану.

Виклад основного матеріалу

Для вирішення зазначеної проблеми авторами було запропоновано метод отримання розрахункових еталонних індикаторних діаграм для будь-якого режиму роботи двигуна, оснований на побудові 3D-поверхні робочих режимів ДВЗ, з використанням в якості базових кривих, індикаторних діаграм, взятих з протоколу стендових випробувань двигуна заводу-виробника [6]. Візуалізація за допомогою 3D-графіки дозволяє надати уявлення о характері протікання робочого процесу на різних режимах навантаження двигуна. Приклади 3D-поверхонь робочих режимів отримані авторами для двигуна 8K90MC-C виробництва компанії HSD-MAN B&W наведено на рис. 1.

Джерелом інформації для оцінки параметрів робочого процесу виступають електронні пристрої для зняття індикаторних діаграм номенклатура яких є дуже широкою. До числа таких пристроїв відносяться виробі закордонних фірм, таких як Friedrich Leutert GmbH & Co. KG (Німеччина) [7]; ICON Research (Великобританія) [8]; IMES GmbH (Німеччина) [9]; Präzisions-Messtechnik Baewert GmbH. (Німеччина) [10], MAN Diesel (Данія) [11]; WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG. (Німеччина) [12]. Кума A.S., (Норвегія) [13] та ін. Серед вітчизняних пристроїв особу увагу заслуговують системи DEPAS, розроблені в Одеському національному морському університеті, під керівництвом професора Варбанця Р.А. [14]. Ці пристрої дозволяють отримати набір параметрів робочого процесу, та його представлення у вигляді графічних залежностей в pV та pV -координатах.

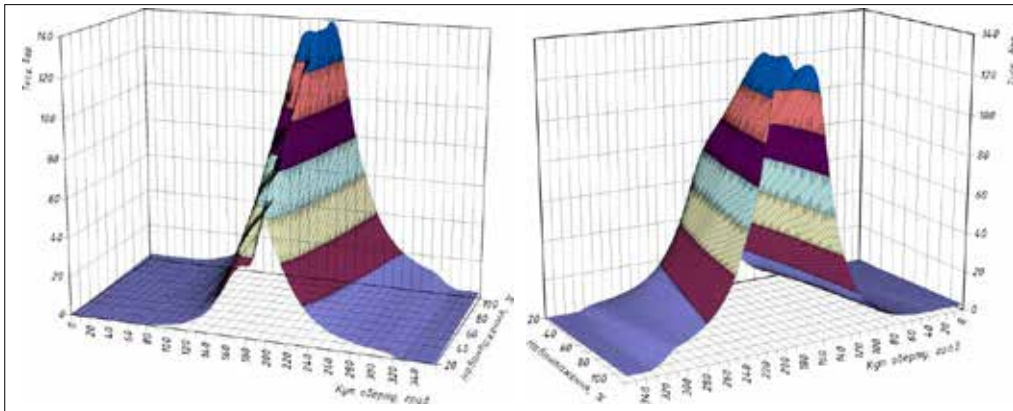


Рис. 1. Приклади 3D-поверхні робочих режимів для двигуна 8K90MC-C виробництва компанії HSD-MAN B&W

Слід відзначити, що більшість діагностичних систем, які зараз використовуються на флоті, дають досить обмежену номенклатуру даних за результатами обробки отриманих індикаторних діаграм. В якості прикладу, на рис. 2, наведено інтерфейс виводу розрахункових даних отриманих за результатами ініціювання двигуна за допомогою переносного пристрою Kuma Diesel Analyzer .

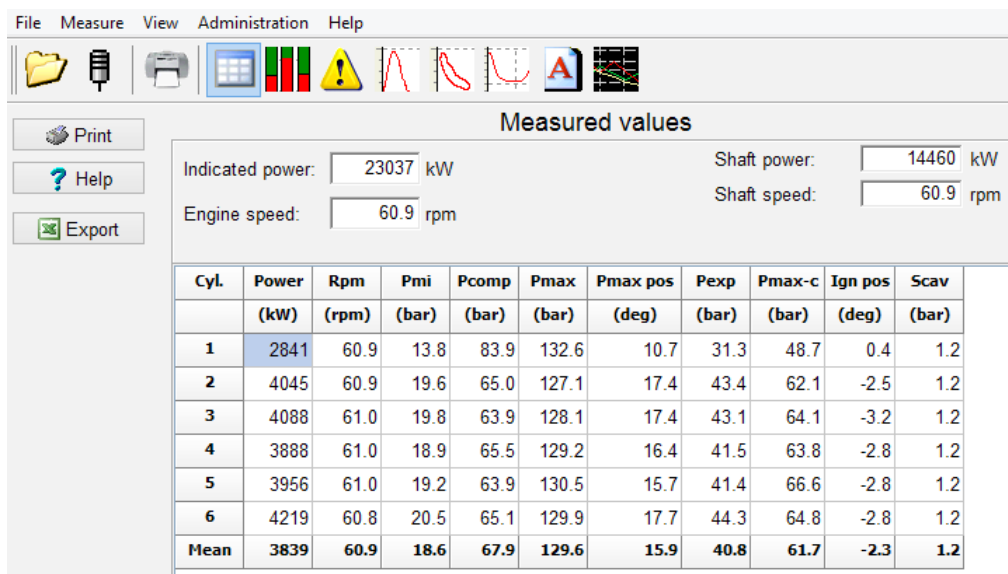


Рис. 2. Інтерфейс виводу розрахункових даних отриманих за результатами ініціювання двигуна за допомогою переносного пристрою Kuma Diesel Analyzer

Окрім виводу графічного відображення індикаторних діаграм у $p\phi$ та pV -координатах, користувачу надається обмежена номенклатура параметрів робочого процесу, а саме: циліндрова потужність (Power); частота обертання (Rpm); середній індикаторний тиск (Pmi); тиск наприкінці стискання (Pcomp); максимальний

тиск циклу (P_{max}); кут досягнення максимального тиску після ВМТ ($P_{max\ pos}$); тиск на лінії розширення при кути 40° після ВМТ (P_{exr}); підвищення тиску у робочому циліндрі в наслідок згоряння (P_{max-c}); кут початку згоряння відносно ВМТ ($I_{gn\ pos}$) и тиск наддувочного повітря ($Scav$).

Але використання цього набору даних в діагностичних цілях дуже ускладнено. В основі більшості методів діагностування лежить порівняння даних отриманих під час обстеження двигуна у процесі експлуатації з значеннями які приймаються в якості еталонних. І саме у цьому полягають складності. Більшість настановних документів рекомендують в якості еталонних використовувати параметри які знято зі справного двигуна (циліндра) на номінальному режимі, однак як визначити ступінь відповідності двигуна справному стану на режимі відмінному від номінального? Для цього треба мати критерії для такого визначення. Таким чином виникає замкнуте коло, щоби визначити справність двигуна необхідні об'єктивні критерії, а щоби мати ці критерії необхідно якимось чином визначитись зі ступеню справності двигуна. В деяких випадках механікам, рекомендується порівнювати отримані параметри з середніми значеннями (саме для цього ці значення окремо розраховуються програмою обробки даних, рис. 2), однак з рис. 2 видно, як відхилення одного циліндру впливають в загалом на весь набір середніх значень. Тому ефективність такого підходу теж дуже сумнівна. Теж саме стосується і графічних відображень індикаторних діаграм у $r\phi$ та p/V -координатах за формою яких пропонується визначити відхилення від нормального перебігу робочого процесу.

Якщо для режимів номінальних навантажень у якості еталонних індикаторних діаграм можуть бути використані діаграми отримані під час стендових випробувань двигуна його виробником, що вже згадувалось вище, то для інших режимів, автори пропонують отримувати еталонні діаграми аналітично, як це показано у роботі [6].

Спираючись на результати аналізу, для демонстрації методу, в якості розрахункового режиму розглянемо роботу двигуна на навантаженні 47% від номінальної потужності. Вибір саме такого навантаження відповідає найбільш поширеному режиму експлуатації головного двигуна серії 8K90MC-C судна ZIM LUANDA (IMO 9403229). Саме таке навантаження дозволяє гарантовано експлуатувати двигун на режимі вище межі включення/виключення допоміжних повітряних продувочних насосів.

Для отримання розрахункової індикаторної діаграми у в $r\phi$ -координатах 3D-поверхню робочих режимів необхідно перетнути площиною перпендикулярною вісі навантажень. Для числового профілю, створеного за допомогою програмного середовища MATLAB & Simulink, щоби виконати цю процедуру достатньо задати координати однієї точки яка належить даній кривій.

В наслідок такого перетину, отримуємо теоретичну еталонну індикаторну діаграму в $r\phi$ -координатах на відповідному режимі (рис. 3).

За результатами обробки базових діаграм за допомогою апроксимації з використанням поверхонь Кунса [15] можливо отримати набір числових масивів, з шагом від 1% по навантаженню, в усьому діапазоні робочих режимів двигуна, який відображає відповідні індикаторні діаграми у $r\phi$ -координатах. Ці масиви можуть бути збережені у любому форматі, включаючи і найбільш поширений формат для

збереження числових даних – Microsoft Excel. Слід відзначити, що саме в цьому форматі судновими механіками ведеться більшість електронних протоколів дослідження технічного стану суднового обладнання и саме в цей формат експортуються данні більшістю програмних продуктів, що йдуть у комплекті з вимірювальними комплексами для індичіювання робочого процесу (рис. 2). Саме тому робота з зазначеними масивами не повинна викликати труднощів у персоналу, що обслуговує енергетичну установку.

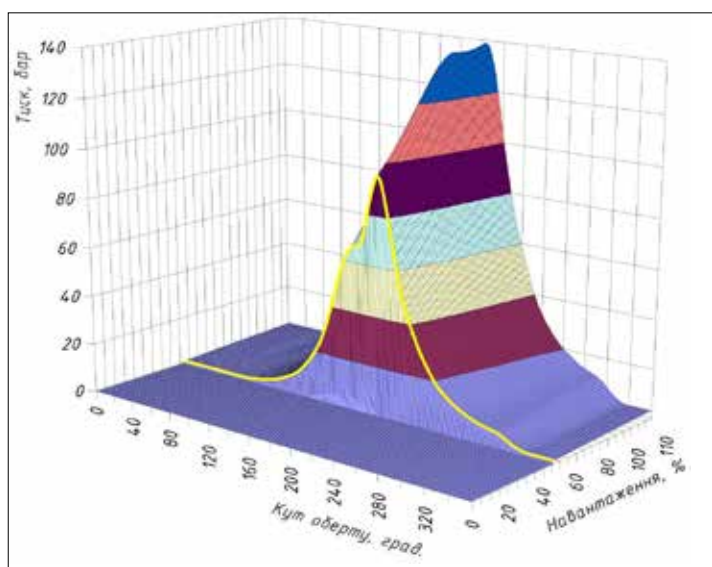


Рис. 3. Приклади отримання розрахункової індикаторної діаграми в рф-координатах для навантаження 47% від номінальної потужності, шляхом перетину 3D-поверхні робочих режимів двигуна 8K90MC-C

Створення числового профілю по базовим діаграмам отриманим у ході приймально-здавальних випробувань двигуна (рис. 1), відбувається за спеціально розробленою методикою з використанням різноманітного програмного забезпечення [6] і виконується окремо для кожного двигуна. Це пояснюється тим, що судові малообертові двигуни є дуже специфічним виробом, тому навіть однотипні двигуни, побудовані різними виробниками в залежності від технологій за якими вони вироблялися, навішаного устаткування, яке може мати відмінні характеристики, налаштування окремих агрегатів і систем, можуть суттєво відрізнитися за характером протікання робочого процесу [6]. Саме тому кожен двигун має свій, досить унікальний цифровий профіль який може бути створено за замовленням судовласника на першому етапі вирішення задачі діагностування двигуна на режимах часткових навантажень. Результатом першого етапу, саме і є створення 3D-поверхні робочих режимів у вигляді числових масивів та надання у супроводі з ними спеціально розробленого розрахункового комплексу, який дозволяє робити поглиблений аналіз робочих процесів з використанням індикаторних діаграм, як експортованих з числового профілю, так і отриманих під час експлуатаційних випробувань двигуна на різних режимах навантаження.

У розрахунковому комплексі реалізовано принцип попередньої обробки імпортованих числових масивів і побудови за ними індикаторних діаграм у $p\phi$ та pV -координатах (рис. 4) [16].

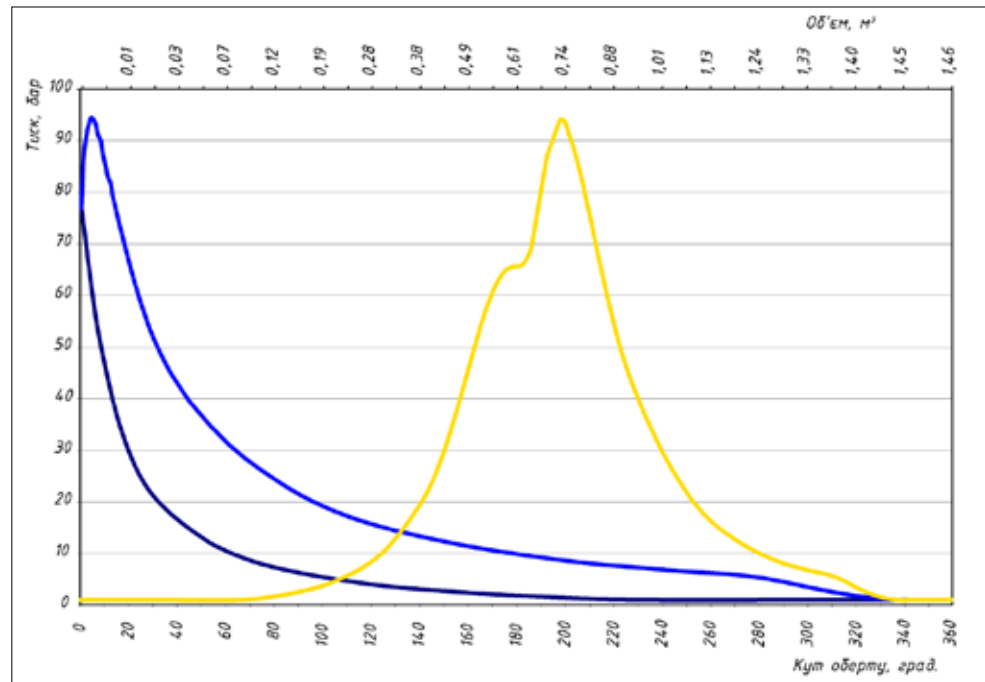


Рис. 4. Індикаторні діаграми у $p\phi$ та pV -координатах побудовані за результатами апроксимації базових кривих для режиму навантаження 47% від номінальної потужності

Подальша обробка діаграм у pV -координатах використовується для визначення енергетичних показників робочого процесу, а у $p\phi$ -координатах для визначення динамічних показників.

На рис. 5, представлено динамічні характеристики робочого процесу та процесу тепловиділення в наслідок згоряння палива, отримані за результатами обробки розрахунковим комплексом еталонної індикаторної діаграми відділеної з масиву даних числового профілю робочого процесу для навантаження 47% від номінальної потужності.

У результаті обробки отриманих діаграм розрахунковим комплексом відзначається ряд показників, які найбільш суттєво характеризують робочий процес та його перебіг. За результатами цих розрахунків інтерфейсом формується таблиця параметрів які виводяться на екран монітору, або роздруковуються на принтері.

При подальшому аналізі технічного стану двигуна або відповідності його регулювань початковим, виконаним заводом-виробником, саме ці параметри можуть бути використані як база для порівняння (табл. 1).

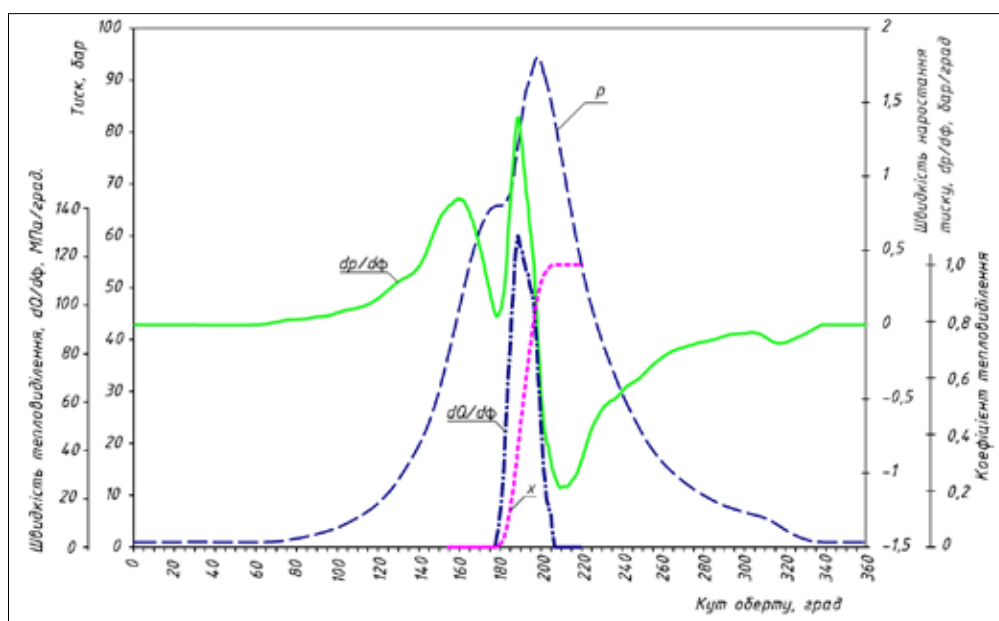


Рис. 5. Розрахункові діаграми динамічності робочого процесу та процесу тепловиділення отримані за результатами обробки розрахункової еталонної індикаторної діаграми для режиму навантаження двигуна 47% від номінальної потужності

Таблиця 1

**Розрахункові параметри робочого процесу двигуна 8K90MC-C
для навантаження 47% від номінальної потужності**

Параметр	Знач.	Параметр	Знач.
1	2	3	4
Вихідні данні			
Максимальний тиск циклу, p_{max} , бар	97	Швидкість наростання тиску $dp/d\phi$, МПа/°	0,140
Оберти двигуна, хв ⁻¹	81	Максимальна температура циклу T_{max} , °С	1836,4
Результати розрахунків			
Паспортна питома витрата палива, г/(кВт×год.)	172,0	Кут досягнення T_{max} , ° після ВМТ	26
		Кут закінчення згорання, ° після ВМТ	27
Газообмін			
Щільність повітря на вході до циліндра, кг/м ³	2,229	Теплота за цикл теоретична, кДж	3102,5
Маса заряду циліндра, кг	2,500	Робота розширення, кДж	2631,6
Питома витрата повітря кг/(кВт×год.)	8,487	Баланс $L_{стис.} = L_{розшир.}$, ° після ВМТ	40
Коефіцієнт надлишку повітря	3,403	Кут відкриття випускного клапану, ° до НМТ	48,5
Кут закриття виходу, ° після НМТ	31		
Кут закриття випускного клапану, ° після НМТ	57,5	Температура на початку випуску відпрацьованих газів, °С	822,77
Втрата робочого об'єму на газообмін, м ³	0,424	Тиск на початку випуску, МПа	0,510

Закінчення таблиці 1

1	2	3	4
Частка втраченого ходу на газообмін	0,290	Кут відкриття продувочних вікон, °до НМТ	31
Стискання			
Тиск наприкінці стискання, МПа (ВМТ)	6,581	Показники робочого процесу	
		Середній індикаторний тиск, МПа	1,116
Температура заряду наприкінці стискання, T_c , °С	960,3	Індикаторна потужність циліндру, кВт	2204,8
Робота стискання, кДж	998,46	Індикаторна потужність двигуна, кВт	17638,1
Згоряння			
Циклова подача, кг	0,073	Ефективна потужність, кВт	16579,8
Кут початку згоряння, °до ВМТ	1,0	Робота за цикл, кДж	1633,16
Максимальний тиск циклу p_{max} , МПа	9,44	Індикаторний ККД циклу	0,526
Кут досягнення p_{max} , °після ВМТ	17,5	Ефективний ККД двигуна	0,494

В такий же спосіб, за допомогою розробленого авторами розрахункового комплексу можуть бути оброблені індикаторні діаграми отримані під час експлуатації двигуна на аналогічному режимі.

Кінцевим результатом розрахунків є два блоки параметрів: еталонних та отриманих під час планового обстеження двигуна. Шляхом порівняння цих параметрів, за існуючими методиками, здійснюється оцінка його технічного стану та правильності регулювання.

У подальшому ця технологія може бути використана як складова частина сучасних діагностичних комплексів, які знаходять все більше застосування на суднах, у тому числі обладнаних двигунами з електронним керуванням.

Висновки

Розроблено методологію отримання еталонних розрахункових індикаторних діаграм для всього діапазону робочих режимів двигуна з застосуванням цифрового профілю робочого процесу. За допомогою розрахункового комплексу, запропонованого авторами, може бути виконано розширений аналіз робочого процесу двигуна з отриманням параметрів, що характеризують його перебіг. Ці параметри можуть бути використані як базові для порівняння з результатами індиціювання двигуна під час його експлуатації.

Порівняння обох блоків параметрів є базою для визначення технічного стану двигуна та правильності його регулювань.

Числові профілі робочого процесу, методологія отримання яких розроблена авторами, може бути використана як складова частина для сучасних діагностичних комплексів, що знаходять подальше поширення на суднах обладнаних двигунами з електронними системами керування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sartini N. More haste less speed. *Container ship focus*. Lloyd's Register, September 2008. Issue 5. P. 3.

2. Slow Steaming (SS) or Super Slow Steaming (SSS) for Container Shipping Part I. *Universal cargo*. January 11, 2011. URL: <https://www.universalcargo.com/slow-steaming-ss-or-super-slow-steaming-sss-for-container-shipping-part-i/>. (дата звернення: 10.09.2022).
3. Notteboom T., Pallis A., Rodrigue. J. Slow steaming in container shipping. *Port Economics, Management and Policy*. New York : Routledge. 2022. URL: <https://portecomonomicsmanagement.org/pemp/contents/part1/ports-and-container-shipping/slow-steaming-container-shipping/>. (дата звернення: 10.09.2022).
4. IMO. Annex VI of MARPOL 73/78 Regulations for the prevention of Air pollution from ships and NO_x technical code. International Marine Organization. London. UK, 1998. 12 p.
5. Delft. An Assessment of Options, Costs and Benefits. *Regulated Slow Steaming in Maritime Transport*. Report. February 2012, P. 25.
6. Білоусов Є.В., Марченко А.П., Рибальченко М.Є., Савчук В.П., Тулученко Г.Я. (2022). Розробка методів оцінки технічного стану двигунів за результатами індиціювання робочого процесу на режимах відмінних від номінальних. *Двигуни внутрішнього згоряння*. № 1.
7. DPI-2 Digital Pressure Indicator Operating Instructions. DPI hand-held unit, version 2.04, Friedrich Leutert GmbH & Co. KG, Germany, Adendorf, Apr. 2014. 54 p.
8. Doctor DK Series. Operating Manual, Revision 2.5. / ICON Research, UK, East Calder, October 2004. 44 p.
9. Intelligent Measuring Systems for economic engine operation. IMES GmbH, Germany, Kaufbeuren. 2012. 12 p.
10. HLV 2005 MK. Short Operating Instructions for the Electronic Indicator. Präzisions-Messtechnik Baewert GmbH. Germany, Meerane, 2006. 26 p.
11. Off-line PMI System Pressure Analyser User's Guide. Reg. № 39661314, MAN Diesel, Denmark, Copenhagen, Jun 2007. 70 p.
12. Hand-held pressure indicator. Model CPH6300-S1 (1-channel version). Model CPH6300-S2 (2-channel version). / WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG., Germany, Klingenberg, 2017. 11 p.
13. Кума Diesel Analyzer. MIP system to optimize the performance of diesel engines. Кума А.С., Bergen, Norway. 2011. 6 p.
14. DEPAS Handy. Diesel engine performance analysing system. / Internal Combustion Engine Monitoring Laboratory of Odessa National Maritime University. Ukraine, Odessa. 2003. 6 p.
15. Jean Gallier (2000). Curves and surfaces in geometric modeling: theory and algorithms. Philadelphia: University of Pennsylvania. 492 p.
16. Білоусов Є.В., Марченко А.П., Рибальченко М.Є., Савчук В.П., Тулученко Г.Я. Оцінка технічного стану двигунів за параметрами робочого процесу на режимах часткових навантажень. XXVII міжнародний Конгрес двигунобудівників, 5–10 вересня 2022 р. С. 23-24.

REFERENCES

1. Sartini N. More haste less speed. *Container ship focus. Lloyd's Register*, September 2008 Issue 5. P. 3.
2. Slow Steaming (SS) or Super Slow Steaming (SSS) for Container Shipping Part I. *Universal cargo*. January 11, 2011. URL: <https://www.universalcargo.com/slow-steaming-ss-or-super-slow-steaming-sss-for-container-shipping-part-i/>. (date to adress: 10.09.2022).
3. Notteboom T., Pallis A., Rodrigue. J. Slow steaming in container shipping. *Port Economics, Management and Policy* New York: Routledge. 2022. URL: <https://portecomonomicsmanagement.org/pemp/contents/part1/ports-and-container-shipping/slow-steaming-container-shipping/>. (date to adress: 10.09.2022).
4. IMO. Annex VI of MARPOL 73/78 Regulations for the prevention of Air pollution from ships and NO_x technical code. International Marine Organization. London. UK, 1998. 12 p.
5. Delft, The ICCT, Mikis Tsimplis. An Assessment of Options, Costs and Benefits. *Regulated Slow Steaming in Maritime Transport*, February 2012, P. 25.
6. Bilousov I.V., Marchenko A.P., Rybalchenko M.Y., Savchuk V.P., Tuluchenko H.Y. (2022). Development of methods for evaluating of technical condition of engines according to the results of indicating of working process on modes excellent from nomin. [Rozrobka metodiv otsinky tekhnichnoho stanu dvyhuniv za rezultatamy indytsiuvannia robochoho protsesu na rezhymakh vidminnykh vid nominalnykh]. *Internal combustion engines*. № 1. [in Ukrainian]
7. DPI-2 Digital Pressure Indicator Operating Instructions. DPI hand-held unit, version 2.04., Friedrich Leutert GmbH & Co. KG, Germany, Adendorf, Apr. 2014. 54 p.
8. Doctor DK Series. Operating Manual, Revision 2.5. / ICON Research, UK, East Calder, October 2004. – 44 p.
9. Intelligent Measuring Systems for economic engine operation. IMES GmbH, Germany, Kaufbeuren. 2012. – 12 p.
10. HLV 2005 MK. Short Operating Instructions for the Electronic Indicator. Präzisions-Messtechnik Baewert GmbH. Germany, Meerane, 2006. 26 p.
11. Off-line PMI System Pressure Analyser User's Guide. Reg. № 39661314, MAN Diesel, Denmark, Copenhagen, Jun 2007. 70 p.
12. Hand-held pressure indicator. Model CPH6300-S1 (1-channel version). Model CPH6300-S2 (2-channel version). / WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG., Germany, Klingenberg, 2017. 11 p.
13. Kyma Diesel Analyzer. MIP system to optimize the performance of diesel engines. Kyma A.S., Bergen, Norway. 2011. 6 p.
14. DEPAS Handy. Diesel engine performance analysing system. / Internal Combustion Engine Monitoring Laboratory of Odessa National Maritime University. Ukraine, Odessa. 2003. 6 p.

15. Jean Gallier (2000). Curves and surfaces in geometric modeling: theory and algorithms. Philadelphia: University of Pennsylvania. 492 p.
16. Bilousov I.V., Marchenko A.P., Rybalchenko M.Y., Savchuk V.P., Tuluchenko H.Y. Evaluation of the technical condition of engines according to the parameters of the working process at partial load modes. [Otsinka tekhnichnoho stanu dvyhuniv za parametry robochoho protsesu na rezhymakh chastkovykh navantazhen]. XXVII International congress of engine builders, 5-10 September 2022. P. 23-24. [in Ukrainian]

MATHEMATICAL MODEL OF TRANSIENT MODES OF ELECTRIC SHIPS' PROPULSION COMPLEXES WITH THRUSTERS

Yarovenko V.O.¹, Chernikov P.S.², Schumylo O.M.³, Zaritska O.I.³

¹Doctor of Engineering, Head of the Department of Operation of ship electrical equipment and automation, *Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine, ORCID ID: 0000-0003-3183-6583*

²PhD, Associate Professor at the Department of Operation of ship electrical equipment and automation, *Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine, ORCID ID: 0000-0002-3280-9889*

³PhD, Professor at the Department of Ship Power Plants and Technical Operation, *Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine, ORCID ID: 0000-0003-0574-1954*

⁴PhD, 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 work is to develop a mathematical model and a method for calculating the maneuvering modes of propulsion electrical power plants with thrusters. **Methodology.** During maneuvering, both the propulsion electric power plant, the thrusters, and the ship's hull operate in transient modes. The durations of transient processes in them are commensurate, so the analysis of the behavior of any constituent part of the propulsion complex should be carried out in unity with all other parts. **The results.** A mathematical model and a method for calculating transient modes of propulsion complexes of electric ships with thrusters have been developed. The operation of thruster propellers is considered taking into account the hydrodynamic processes of their interaction with the ship's hull, viscous losses and viscous interaction. The criteria of dynamic similarity and the generalized dimensionless parameters of the complex affecting the maneuverability indicators were revealed. The workability of the model and the calculation method is confirmed by the results of numerical simulations, which illustrate the effect of the operation of the thrusters on the electric ships' maneuverability. **Scientific novelty.** The model and the calculation method allow calculating the main mode indicators and indicators of the quality of maneuvering of modern electric ships equipped with thrusters. At the same time, control of operating parameters of all components of the propulsion electric power plant is carried out. There is an opportunity to design propulsion plants according to the final result – according to the quality of the vessel's maneuverability. **Practical value.** The calculation method will make it possible to conduct a study of the behavior of propulsive complexes during maneuvering, to optimize the control*

process, and to find ways to increase the electric ships' maneuverability. Bible. 15, tab. 2, Fig. 7.

Key words: electric ship's propulsive complex, thrusters, mathematical model of transient modes.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ ЕЛЕКТРОХОДІВ З ПІДРУЛЮЮЧИМИ ПРИСТРОЯМИ

Яровенко В.О.¹, Черников П.С.², Шумило О.М.³, Зарицька О.І.⁴

¹д.т.н., професор, завідувач кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики,

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-3183-6583

²к.т.н., доцент, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики,

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-3280-9889

³к.т.н., професор, проректор з навчально-педагогічної роботи, доцент кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-0574-1954

⁴к.т.н., доцент, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики,

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-8530-1106

Анотація

Метою роботи є розробка математичної моделі та методу розрахунку перехідних режимів гребних електроенергетичних установок з підрулюючими пристроями. **Методика.** При маневруванні і гребна електроенергетична установка, і підрулюючі пристрої, і корпус судна працюють на перехідних режимах. Тривалості перехідних процесів у них співмірні, тому аналіз поведінки будь-якої складової частини пропульсивного комплексу повинен проводитися в єдності з усіма іншими частинами. **Результати.** Розроблено математичну модель та метод розрахунку перехідних режимів пропульсивних комплексів електроходів з підрулюючими пристроями. Робота гребних гвинтів підрулюючих пристроїв розглянута з урахуванням гідродинамічних процесів їх взаємодії з корпусом судна, в'язкісних втрат і в'язкісної взаємодії. Виявлено критерії динамічної подібності та узагальнені безрозмірні параметри комплексу, що впливають на маневрені показники. Працездатність моделі та методу розрахунку підтверджені результатами чисельного моделювання, що ілюструють вплив роботи підрулюючих пристроїв на маневреність електроходів. **Наукова новизна.** Модель і метод розрахунку дозволяють розраховувати основні режимні показники та показники якості маневрування сучасних електроходів, обладнаних підрулюючими пристроями. Одночасно здійснюється контроль режимних показників всіх складових частин гребної електроенергетичної установки. З'являється можливість проектування гребних установок за кінцевим результатом – за якістю маневрування судна. **Практичне значення.** Метод розрахунку дозволить проводити дослідження

поведінки пропульсивних комплексів при маневруванні, оптимізувати процес управління, відшукувати шляхи підвищення маневреності електроходів. Бібл. 15, табл. 2, рис. 7.

Ключові слова: пропульсивний комплекс електрохода, підрулюючі пристрої, математична модель перехідних режимів.

Relevance. The controllability of the vessel, that is, its ability to follow a given trajectory or change the direction of movement at the command of the shipmaster, is one of the important seafaring qualities that determine the operational capabilities of the ship and, to a large extent, the safety of navigation. Traditionally, the main means of controlling the ship is the stern rudder. However, the action of the rudder is effective only if there is a significant speed of the ship. In certain operating conditions (on a limited fairway, on moorings, when maneuvering in limited conditions, etc.), it is impossible to develop a speed sufficient for effective control of the vessel. Poor controllability of ships in similar conditions was the cause of most accidents: collisions; groundings and groundings on rocks; impacts against the walls of piers, etc. To ensure controllability at low speed and without speed, thrusters (*Th*) are installed on ships, which create additional steering thrust. They can create lateral force at any, however small, speed of the vessel. After 1965, when Kawasaki launched *Ths* production, they began to be used as the most important elements of the propulsion system and began to be widely used for almost any type of vessel, from dry cargo, passenger, container carriers to offshore. The power of the thruster electric motors varies from several dozen to 5000 kW. It should be enough to ensure the required thrust value of the thruster propellers. The magnitude of this power depends on many factors, and first of all on the required maneuverability properties, and even for vessels with a moderate degree of maneuverability. The share of power (K_{TR} -coefficient) of *Th* electric motors relative to the power of the propulsion electrical power plant (PEPP) reaches $K_{TR} = 0,24$ (see table 1).

Table 1

Proportion of engine power of propulsion devices in PEPP

Name of the vessel	Arctikaborg	Europa 2 (Hapaq-Lloyd)	Vasily Dinkov	Mikhail Ulyanov	Carnival Miracle
Type	Icebreaker	Cruise vessel	Arctic tanker	Arctic tanker	Cruise vessel
Vessel length, m	65,1	225,4	257,3	257,7	292,5
<i>Th</i> total power, kW	150	1750	2000	4000 (2×2000)	5730 (3×1910)
PEPP total power, kW	3240 (2×1620)	14500 (2×7250)	20000 (2×10000)	17000 (2×8500)	35200 (2×17600)
Power share K_{TR} of <i>Th</i> motors	0,05	0,12	0,1	0,24	0,16

Thus, the thruster is one of the most powerful electricity consumers on the ship. Its work has a very significant effect on the operation of the ship's power plant, on the electrical power quality of the ship network. Therefore, a number of tasks arise in the process of designing and operating electric motors, the most important of which is to

achieve the necessary maneuverability of the vessel, while ensuring the proper operation of both the ship's electrical power sources and the ship's general consumers. Their solution can be sought by modeling the maneuvering modes of operation of electric ships with thrusters.

State of the issue. The operation of thrusters during ship maneuvering has been considered in numerous studies. But for the most part, they are aimed at solving specific applied tasks that relate specifically to thrusters. In particular:

Works [1–4] present the results of experimental and numerical research of hydrodynamic characteristics and the effect on the efficiency of bow thrusters (*ThB*): different chamfer depths and tunnel opening angles [1]; different angles of water inflow and fillet radii [2]; interaction of several bow thrusters at “zero” ship speed [3], pressure fluctuations in the tunnel [4].

Work [5] is devoted to the modeling of the load on the *ThB* in operating conditions. The analysis of the operation of the *ThB* motor in conditions of voltage imbalance that occurs on the ship was carried out in [6]. Issues of operational control to increase the energy efficiency of ship micro nets (including *ThB*) are considered in work [7].

Article [8] proposes a method of building the trajectory of a ship's turn using a control device. The expert system that ensures the design of the ship's power subsystems, in particular the *Th* subsystem, is presented in work [9]. The simplest mathematical models are used here for the approximate selection of structural elements of the thrusters. The proposed expert system is intended to check at the initial stages of design the compliance of the analyzed structure with the requirements of classification societies.

A number of works [10; 11] consider the issues of transition from the most common independent control bodies for thrusters, propellers and ship rudders to an integrated, power-optimized, generalized control system using a joystick with three degrees of freedom. In particular, [10] investigates the problems of thrust distribution in the propulsion electrical power plant, consisting of propulsion motors (*PM*), tunnel or azimuth thrusters during their interaction. The purpose of the study is to increase the efficiency (reduction of energy consumption while maintaining maneuverability) of movement and the accuracy of thrust generation from the motion controller. In [11], the results of studies of potential energy savings in the operation of a RoPax twin-screw ferry with a bow thruster are presented. The research was carried out on the basis of a simulator and is aimed at improving maneuvering in sea ferry ports, that is in marine areas sensitive to harmful emissions into the environment.

Analysis of the published results of earlier studies allows coming to the following conclusions.

The main task that researchers set themselves is to assess the maneuverability of vessels equipped with thrusters. At the same time, only the tasks of controlling the movement of the vessel are solved. The authors try not to touch the propulsion plant, to avoid issues of interaction between the propellers and the ship's hull. Most often, the works deal with the issues of improving the structural parameters of the *Th*, creating the software of the simulators, which should be used to practice the techniques of controlling the vessel movement.

Ship electrical power equipment is not considered. It is assumed that propulsion motors and propellers work in stable mode, at low speed. Thus, from the single ship

propulsion complex (ship hull, propellers, propulsion electrical power plant) are, in fact, separated and only the ship hull is considered.

At the same time, a number of questions arise. And is the propulsive complex with thrusters capable of performing the planned maneuver? Is the ship's electrical power plant able to ensure the operation of this complex? What will be the load on the electric power system? Will the protection system not work in this case and will the maneuvering process face a dangerous situation of failure to maneuver in a limited water area?

To answer these questions, a systematic approach is necessary: the electric ship's propulsion electrical power plant with thrusters must be considered together with all the components of a single ship propulsion complex. A suitable mathematical apparatus is necessary in order to solve the problems of controllability of vessels with thrusters during maneuvering operations, for the correct layout and design of the electrical power system capable of providing the vessel with high maneuverability qualities, for the possibility of finding the best options for controlling such a complex propulsive system in various modes of operation. The purpose of this work is to build a mathematical model of transient modes of electric ships' propulsive complexes with thrusters.

Problem solving method. As a basis for the analysis of the maneuverability characteristics of the electric ships' propulsion complexes with *Th* it is proposed to lay a mathematical model of the transient modes of the propulsion complex with a single shipboard electric power plant, which is presented in works [12; 13]. The version of the propulsion plant given by them corresponds to the classic layout of the electric propulsion system based on frequency-controlled propulsion motors. The electrical power plant includes heat engines, synchronous generators, ship-wide power consumers and several (usually two or three) "power" propulsive circuits. Each circuit includes a frequency converter, an asynchronous propulsion motor and a propeller. In addition to the propulsion electric power plant, the propulsive complex includes the rudder and the ship's hull.

The model and the calculation method developed on its basis allow calculating the current values of the main mode indicators of all constituent parts of the propulsive complex during maneuvers:

- for each power circuit: angular speed of rotation, torque and the heat engine power; generator voltage and current; voltage, current, torque and angular speed of rotation of the propulsion motor;
- according to the parameters of the ship's movement: the speed of movement in the coordinate system connected and not connected to the ship; angular speed of rotation around the vertical axis; drift angle and vessel course angle.

If necessary, any other regime indicators obtained in the process of calculations can be registered.

The presented model has shown its efficiency. By analogy with it, and in accordance with the goal set in this work, it is proposed to develop and introduce into the propulsive complex a mathematical description of the processes that take place in the thrusters during ship maneuvering. This will make it possible to analyze the maneuverability characteristics of modern electric ships, evaluate the operating modes of their electric power plants, and open up opportunities for optimal design and optimal control of ship propulsion complexes.

The thruster propeller, like any ship's propeller, interacts with the environment, with the walls of the channel, with parts of the *Th* itself. Despite the fact that the main mode of the thruster operation is to control the vessel in the absence of its motion, at low speed it, nevertheless, significantly affects the vessel movement and is used during maneuvering. The operation of a real thruster is affected by viscous losses and viscous interaction, channel configuration, and much more [14]. Based on this, taking into account the difficulties in describing the working processes of propellers of propulsion and steering systems, the inaccuracy in determining the main coefficients of interaction between the propellers and the ship's hull, researchers try to avoid considering the hydrodynamic processes of the interaction of the thruster propellers with the ship's hull. They try to use some generalized coefficients, the accuracy of which is small, and the physical value is not completely defined. Such a simplified approach is acceptable to a certain extent if it is only about an approximate assessment of the maneuvering characteristics of the vessel. If, in the course of research, questions are asked from the perspective that was determined in the form of the goal of this work, if it is about the ability of the electric vessel and its electric power plant to perform the task while maintaining the operability of all ship systems, it is mandatory to take into account the hydrodynamic processes of the interaction of the thruster propellers with the ship's hull. It is also obligatory to take into account the interaction of the remaining components of the ship's electrical power plant.

It is proposed to lay the well-known Hoffmann method [14] as the basis for the hydrodynamic calculation of the thruster propellers. The method is based on serial test diagrams of propellers in a thin cylindrical pipe. K4-55 type propellers were used (B4-55 Wageningen basin propellers with a blade contour in the form of a Kaplan turbine blade).

The following should be noted immediately. Naturally, for the propellers with other profiles and parameters, the diagrams will differ. But firstly, it does not affect the method of calculating hydrodynamic characteristics. Secondly, the system of dimensionless parameters, which is embedded in the mathematical model developed in this work, and the adopted approach to the analysis of transient modes of operation (in which the generalized dimensionless parameters of the electric ship's propulsive complex are used as varying parameters) completely eliminate the difference between these parameters.

The calculation is based on the following provisions.

1. During the operation of the propeller in a thin cylindrical pipe in the mooring mode (vessel speed $v = 0$, propeller advance $\lambda = v/Dn$, where D and n are the diameter of the propeller and its rotation frequency), the relative advance of the propeller according to the speed of water flow $\lambda_s = v_s/Dn$ in the pipe depends only on the pitch ratio of the propeller P/D (Fig. 1).

The propeller thrust in this mode (neglecting the small resistance of the thin pipe $\xi \approx 0$) corresponds to

$$P_{Th} = \rho A_0 (\omega^2 / 2) = \rho A_0 (v_s^2 / 2), \quad (1)$$

where ρ – water specific gravity; A_0 – area of the propeller disk; ω – axial component of speed caused by the propeller; v_s – speed of water flow through the propeller.

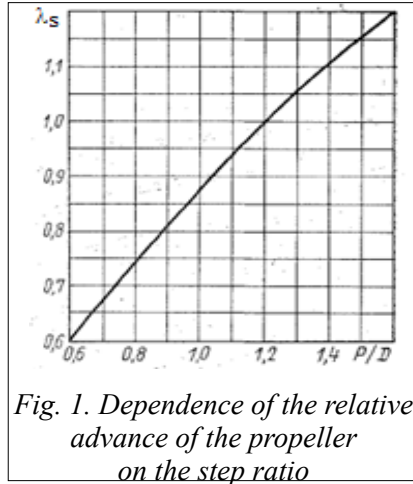


Fig. 1. Dependence of the relative advance of the propeller on the step ratio

The load factor of the propeller according to the speed of the water inflow

$$\sigma_{ps} = 2T / \rho v_s^2 A_0 = 1,0. \quad (2)$$

The thrust coefficient $\sigma_{ps} = 2T / \rho v_s^2 A_0 = 1,0$.

The propeller thrust in this mode (neglecting the small resistance of the thin pipe $\xi \approx 0$) corresponds to

$$P_{Th} = \rho A_0 (\omega^2 / 2) = \rho A_0 (v_s^2 / 2), \quad (1)$$

where ρ – water specific gravity; A_0 – area of the propeller disk; ω – axial component of speed caused by the propeller; v_s – speed of water flow through the propeller.

The load factor of the propeller according to the speed of the water inflow

$$\sigma_{ps} = 2T / \rho v_s^2 A_0 = 1,0. \quad (2)$$

The thrust coefficient $\sigma_{ps} = 2T / \rho v_s^2 A_0 = 1,0$.

2. In running mode, the thrust, the propeller load factor and the thrust factor are determined by ratios

$$P_{Th} = \rho A_0 \left(v + \frac{\omega}{2} \right) \frac{\omega}{2} = \frac{\rho A_0}{2} (v_s^2 - v^2); \quad (3)$$

$$\sigma_{ps} = \frac{2T}{\rho v_s^2 A_0} = 1,0 - \left(\frac{v}{v_s} \right)^2; \quad (4)$$

$$k_p = \left(\frac{\pi}{8} \right) (\lambda_s^2 - \lambda^2). \quad (5)$$

3. During the operation of the propeller in a cylindrical pipe, which has resistance $\zeta_k \neq 0$ in the mooring mode, the additional thrust required to overcome this resistance and the additional part of the thrust coefficient are equal to

$$\Delta P_{Th} = \zeta_k \rho A_0 \left(\frac{v_s^2}{2} \right); \quad (6)$$

$$\Delta k_p = \left(\frac{\pi}{8} \right) \zeta_k \lambda_s^2. \quad (7)$$

The thrust coefficient

$$k_p = \left(\frac{\pi}{8} \right) \lambda_s^2 (1 + \zeta_k) \quad (8)$$

Thus, it follows from ratios (5) and (8) that the operation of the propeller in a cylindrical pipe with a resistance coefficient $\zeta_k \neq 0$ is equivalent to the operation of the propeller-cylindrical pipe system with a negative relative advance of the propeller

$$\lambda = -\lambda_s \sqrt{\zeta_k} < 0. \quad (9)$$

Paper [14] presents diagrams of serial tests of propellers in a cylindrical pipe, extrapolated to the region of small negative values of the negative stroke. These are

graphical dependences of the thrust coefficient k_p and the coefficient of the moment of resistance k_Q of the propeller as a function of the relative advance and the step ratio P/D (Fig. 2). The diagrams can be successfully used to calculate in the first approximation the main characteristics of the thruster propellers during the design and calculation of their main operating parameters at stable modes.

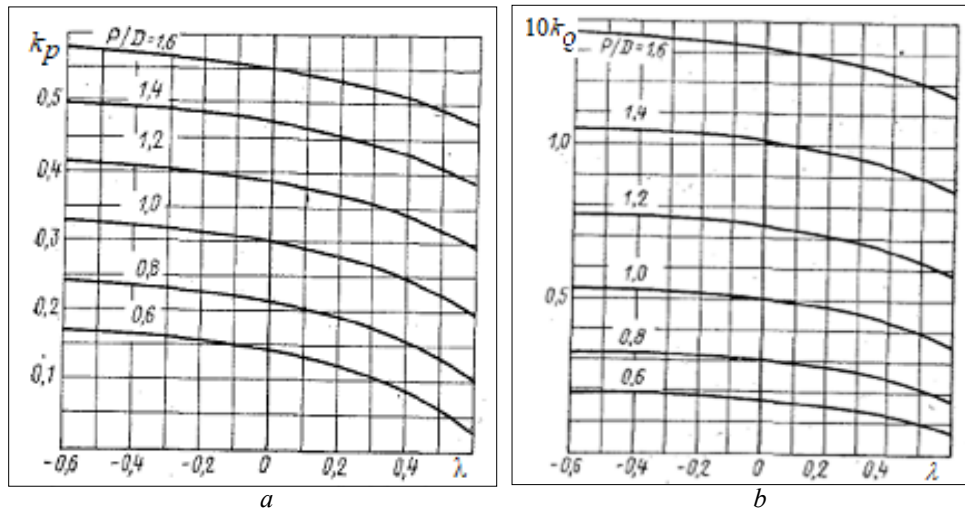


Figure 2 – Dependencies:
a – of the thrust coefficient k_p ; b – the resistance moment coefficient k_Q
as a function of the relative advance and step ratio

However, the graphical method presented in [14] does not allow calculating the operation of the Th in maneuvering modes, since both the step ratio and the advance of the propellers are continuously changing. It is necessary to build a method for calculating the current values of the main operating parameters of the propellers (thrust and moment of resistance on the shaft) with time-varying step ratio (which is a control parameter) and propeller advance, and to integrate the obtained algorithm into the mathematical model of a single ship propulsion complex.

Analytical dependencies play an important role in the method of calculating the main regime indicators:

a) the relative advance of the propeller according to the water flow rate λ_s from P/D (Fig. 1). This dependence can be represented by a linear equation

$$\lambda_s = 0,3015 P/D; \quad (10)$$

b) dependences of the thrust coefficient k_p and the coefficient of the resistance moment k_Q of the propeller on the advance of the propeller λ and the step ratio P/D

$$k_p = 0,0314(P/D)^2 + 0,3417P/D - 0,0706 + 0,05\lambda, \quad (11)$$

$$k_Q = 0,0434(P/D)^2 + 0,025P/D - 0,0179 + 0,005\lambda. \quad (12)$$

When calculating the maneuvering modes, the thrust P_{Th} and the resistance moment M_{Th} of the thruster propeller are found by the method of successive approximations at each step of the integration of the system of equations, which describes the transient processes in the electric ship's propulsive complex.

The operation of the propeller begins after the output of the drive electric motor to the steady operation mode.

At the initial instant of time, the propeller advance λ , the pitch ratio P/D , and the resistance moment coefficient k_Q are zero. The moment of resistance on the electric motor shaft is determined by the moment of resistance of frictional forces. As the step ratio (control signal) increases, the coefficient k_Q begins to increase, correspondingly, the resistance moment of the thruster propeller increases, which can be determined with a sufficient degree of accuracy from the ratio

$$M_{Th} = \frac{9550 (k_Q 2\pi D^5 n^3)}{n}. \quad (13)$$

The torque M_{MTh} on the motor shaft M_{Th} increases. The electric motor, maintaining (in accordance with the statics of the working section of the mechanical characteristics) revolutions, “takes” the load. With an increase in the step ratio, the advance of the thruster propeller λ_s appears, which will initially be negative. This is the “viscous” component of advance. It is determined from the obtained analytical dependence (10) λ_s on P/D . After that, the specified value of the advance of the propeller is found

$$\lambda = -\lambda_s \sqrt{\zeta_k}. \quad (14)$$

For the refined value of λ , new values of the coefficient k_Q and the moment M_{Th} are calculated (12).

According to the obtained dependences (11) of the thrust coefficient k_p on the advance λ and the step ratio P/D , the thrust coefficient, the propeller thrust P_{Th} and the thruster thrust T_{Th} are calculated

$$P_{Th} = k_p \rho D^4 n^2; \quad (15)$$

$$T_{Th} = P_{Th} (1 + t), \quad (16)$$

where t – the absorption coefficient.

During the operation of the Th in the running mode of the vessel, the jet of water flowing out of the channel at the speed v_s interacts with the water flow flowing into the jet at the speed of the vessel v at an angle of 90° . As a result of the mixing of flows, complex turbulence processes arise, which lead to the distortion of the jet. The degree of development of these processes depends on the ratio between v and v_s – on the parameter $m = v/v_s$.

The interaction of the jet with the water flow carried by this jet leads to the formation of a discharge zone between the ship’s hull and the jet. As a result, the suction force ΔT_{Th} appears, which is directed to the side, opposite to the action of the propeller thrust T_{Th} , and is applied in the area between the Th and the center of the ship.

As a result, the total force acting on the ship and its moment relative to the gravity center decrease. According to the results of the test in the experimental basin, the dependencies [14] for the relative value of the resulting transverse force $\overline{T_{Th}^0}$ and the relative resulting moment $\overline{M_{HTH}^0}$ (Fig. 3) were obtained.

$$\overline{T_{Th}^0} = \frac{T_{Th} - \Delta T_{Th}}{T_{Th}}; \quad (17)$$

$$\overline{M_{HTH}^0} = \frac{T_{Th}h_h - \Delta T_{Th}h_c}{T_{Th}h_h} = \frac{T_{Th}h_h - \Delta T_{Th}h_c}{T_{Th}\overline{h}_h}, \quad (18)$$

where h_h – coordinate of application of propeller thrust T_{Th} and its relative value $\overline{h}_h = \frac{h_h}{L}$; h_c – is the coordinate of application of the suction force ΔT_{Th} and its relative value $\overline{h}_c = \frac{h_c}{L}$.

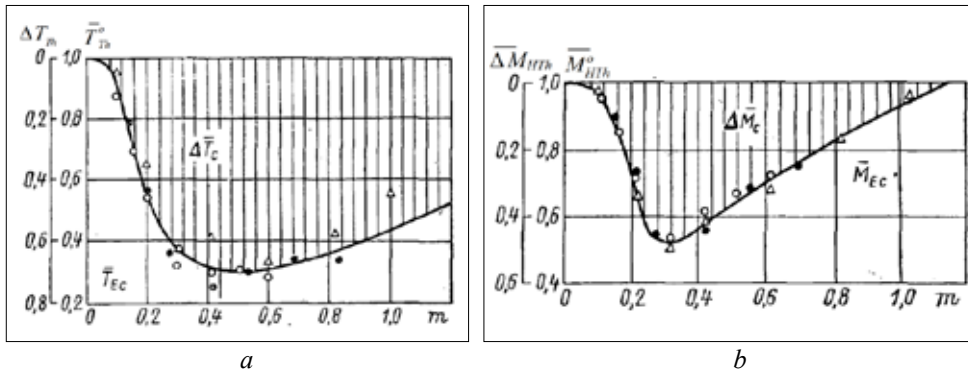


Fig. 3. The relative value of the:
a – resulting transverse force; b – moment acting on the ship during the operation of the ThB with the simultaneous translational movement of the ship

$$\overline{T_{Th}^0} = \frac{T_{Th} - \Delta T_{Th}}{T_{Th}}; \quad (17)$$

$$\overline{M_{HTH}^0} = \frac{T_{Th}h_h - \Delta T_{Th}h_c}{T_{Th}h_h} = \frac{T_{Th}h_h - \Delta T_{Th}h_c}{T_{Th}\overline{h}_h}, \quad (18)$$

where h_h – coordinate of application of propeller thrust T_{Th} and its relative value $\overline{h}_h = \frac{h_h}{L}$; h_c – is the coordinate of application of the suction force ΔT_{Th} and its relative value $\overline{h}_c = \frac{h_c}{L}$.

The dependence of the position of the application point of the suction force on the parameter m is shown in Fig. 4.

As can be seen from Fig. 3, the negative effect of the suction force is manifested at low speeds of movement – from 3 to 5 knots. At the same time, the thrust of the thruster propellers is at the level of 30% – 40%, and the moment from this force does not exceed 50% of the corresponding values when the vessel is not moving. This is a very

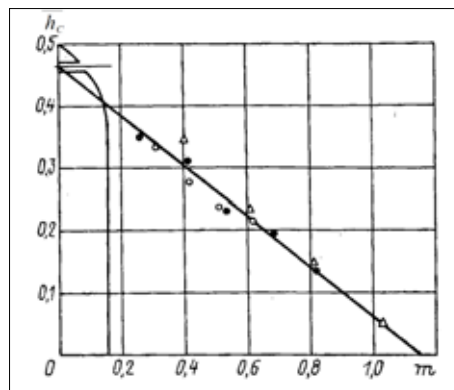


Fig. 4. The position of the suction force application point ΔT_{Th} depending on the parameter m

dangerous situation, since it is precisely at such speeds that thrusters are used. Therefore, taking into account the suction force during the operation of the thrusters at low speed is mandatory.

To obtain analytical dependences $\overline{T_{Th}^0}$ and $\overline{M_{HTTh}^0}$ on the parameter m , we will use the MATLAB function of data approximation by polynomials.

According to its results, the following dependencies were obtained:

$$\overline{T_{Th}^0} = -1,7191m^4 + 1,6259m^3 + 2,3692m^2 - 2,8864m + 1,0373; \quad (19)$$

$$\overline{M_{HTTh}^0} = -4,1084m^4 + 6,0548m^3 - 0,3785m^2 - 1,699m + 1,0403. \quad (20)$$

The dependence on the parameter m is linear

$$\overline{h_c} = 0,461 - 0,408m. \quad (21)$$

The developed model of the hydrodynamic calculation of the main mode parameters of the thruster propellers is integrated into the generalized mathematical model of the transient modes of the electric ship's propulsion complex. [15]. Taking into account the thruster, the structural scheme of the complex will undergo significant changes. In this case, it has the form shown in Fig. 5.

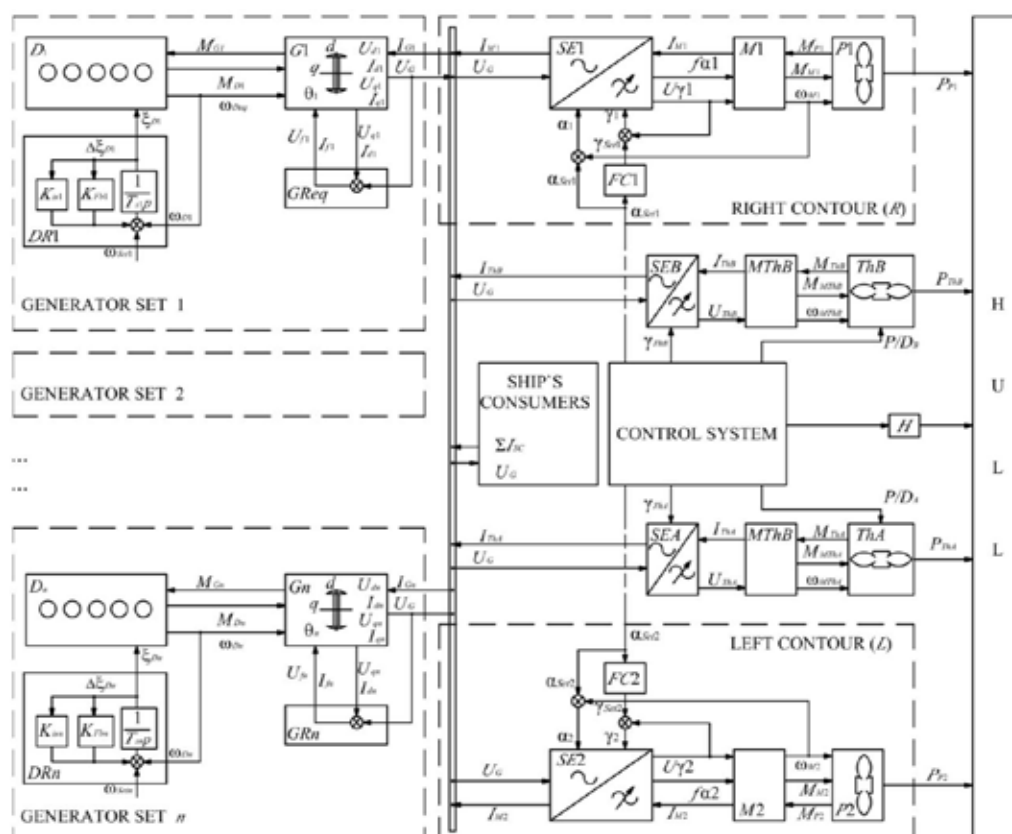


Fig. 5. Structural diagram of the electric ship's propulsive complex with thrusters

The propulsive complex includes the following main components:

- electric generation system from several generator units with active and reactive power distribution systems: $D1, D2, \dots, D_n$ – heat engines; $G1, G2, \dots, G_n$ – synchronous generators (SG);
- two “power” circuits, in each of which: $SE1, SE2$ – frequency converters; $M1, M2$ – asynchronous propelling electric motors; $P1, P2$ – propellers;
- bow and stern thrusters, which include: SEB and SEA – voltage converters (for starting) bow and stern thrusters; $MThB, MThA$ – drive electric motors; ThB and ThA – bow and stern thruster propellers;
- rudder – R ;
- ship’s hull.

Elements of the automatic regulation system and the main parameters connecting the power units and control signals: primary speed regulator – DR ; automatic generator voltage regulator – GR ; M_D and ω_D – torque and angular speed of rotation of the heat engine; M_G – electromagnetic moment of the generator; U_d and U_q – voltages of the generator along the longitudinal and transverse axes (internal coordinates); I_d and I_q – generator currents along the longitudinal and transverse axes (internal coordinates); U_G – generator output voltage; ω_{set} – setting of the angular speed of rotation of the speed controller; ξ_D – stroke of the fuel pump rail; $1/T_{sp}$ – servo motor link; K_{fb} and K_{is} – amplification coefficients of rigid and flexible (isodromic) feedback links; U_f and I_f are voltage and excitation current of the synchronous generator; I_G, I_M – SG and PM currents; α_{set} and γ_{set} – relative frequency and voltage of the converter (control signals); α and γ – relative frequency and voltage at the output of the converter (taking into account feedback); FC – a functional converter that forms the law of frequency control $\gamma = f(\alpha)$; M_p and P_p – moment and thrust of propellers; M_M and ω_M – torque and angular speed of rotation of the electric motor; U_{Th} and I_{Th} – voltage and current of thruster electric motors; M_{Th} and ω_{Th} – moment and angular speed of rotation of electric motors Th, P_{Th} and M_{Th} – thrust and moment of resistance of thruster propellers; γ_{Th} – voltage control signals of the thruster electric motor; P/D is the pitch ratio of thruster propellers.

The main ratios of the energy transmission channel to propulsion electric motors (abbreviated version of the generalized mathematical model of transient modes) are presented below. The system of equations describing the transient modes of operation of the propulsive complex is presented in relative units. Relative values of mode indicators are indicated by symbols with a dash on top. (The index “0” corresponds to the values of these indicators, when the electric motor is operating in a stable mode with the nominal power of the PEPP).

Equations of motion of generator units of a ship’s power plant with regulators of their rotation speed

$$\frac{d\overline{\omega_D}}{dT} = N_D (\overline{M_D} - \overline{M_G}), \quad (22)$$

where $N_D = \frac{M_{D0}L}{J_D \omega_{D0} v_0}$ – criterion of dynamic similarity; J_D – the moment of inertia of the engine and generator reduced to the shaft of the heat engine; T – relative (dimensionless) time $T = \frac{v_0}{L} t$; v_0 – vessel speed; L – vessel length; t – the time.

The torque of the heat engine is represented as the relative movement of the fuel pump rail

$$\overline{M}_D = \overline{\xi}_D. \quad (23)$$

Electromagnetic resistance moment of the generator

$$\overline{M}_G = -K_{G1} \overline{I}_G^2 \sin \psi_G \cos \psi_G + K_{G2} \overline{I}_f \overline{I}_G \cos \psi_G,$$

where ψ_G – the angle of phase shift between vectors \overline{E}_G and \overline{I}_G ; K_{G1} , K_{G2} – dimensionless parameters of the propulsive complex.

The mathematical model of transient modes of synchronous generators is obtained taking into account the Park-Horev equations. At the same time, a simplified version was used, which provides accuracy comparable to the accuracy of the description of transient processes of other constituent parts of the complex. The voltage at the output of the generator is determined by the ratio

$$\overline{U}_G = \sqrt{\overline{U}_d^2 + \overline{U}_q^2}, \quad (24)$$

where \overline{U}_d and \overline{U}_q are generator voltages according to internal d - q coordinates.

Frequency converters (for frequency control of propelling electric motors) and voltage converters (for smooth starting of thruster electric motors) are represented by inertialess electricity converters. The output voltage of converters U_M (voltage at the input of electric motors $U_{\gamma 1}$, $U_{\gamma 2}$, U_{ThB} , U_{ThA}) depends on the input voltage (voltage of the generator U_G) according to the ratio

$$\overline{U}_M = \gamma \overline{U}_G, \quad (25)$$

where γ – a control parameter.

Equations of motion of frequency-controlled PEMs

$$\frac{d\overline{\omega}_M}{dT} = N_M (\overline{M}_M - \overline{M}_P), \quad (26)$$

where

$$N_M = \frac{M_{M0} L}{J_M \omega_{M0} v_0} \quad (27)$$

criterion of dynamic similarity;

J_D – is the moment of inertia of the motor, the propeller and the mass of water attached to it, applied to the shaft of the propulsion electric motor.

A full description of the transient processes in the propulsion electric power plant, with justification of the assumptions made, as well as the method of calculating the dimensionless parameters and similarity criteria of the propulsive complex, obtained in the process of building the model, is given in [12].

The propulsion electric power plant is controlled from the control panel (CP) on the bridge. The output signals of the CP are:

– control signals on the $SE1$ and $SE2$ frequency converters of propulsive electric motors PEMs (in terms of frequency α_{Set1} , α_{Set2} and, with the help of functional converters $FC1$, $FC2$, in terms of voltage – γ_1 , γ_2);

– voltage control signals γ_{ThB} , γ_{ThA} on SEB , SEA voltage converters for soft start of thruster electric motors;

– control signals according to the step ratio P/D of the thruster propellers ThB and ThA ;

– steering angle – β_R .

The equations of the control system link the signals applied to the inputs of the control system with the voltage at the output of the corresponding control channel.

In the general case, this connection has the following form:

$$A_{Kr}(t)(U_{out})_{Kr} = K_{Kr}^{CS} \sum_i K_i^{CS} (U_{Ui} - U_{Ci}), \quad (28)$$

where K – a control object; r – controlled parameter; A_{Kr} – a functional dependence of control devices on time, including the derivative; $(U_{out})_{Kr}$ – a control signal at the input of the K -th object according to the r -th parameter; K_{Kr}^{CS} – amplification factor for the r -th control parameter of the K -th object; U_{Ui} – signals of control and corrective connections; U_{Ci} – comparison (cut-off) voltage; K_i^{CS} – the amplification factor for the i -th control signal.

In each specific case, the automatic control system has its own “set” of control signals for each control channel.

Electric ship’s hull.

With the appearance in the mathematical model of the propulsive complex of thrusters, the equations of the ship motion undergo significant changes. Additional forces and moments from thrusters appear in the right-hand sides of these equations.

The components of the electric ship’s speed of movement along the X , Y axes and the speed of rotation around the Z axis, with a modern approach to describing the movement of the vessel on the free surface of the water in the $GXYZ$ coordinate system associated with it, will take the following form:

$$\frac{d\overline{v}_X}{dT} = C_{\lambda 2} \overline{v}_Y \overline{\Omega}_Z + N_X \left\{ \sum_j K_{Pj} \overline{P}_{ej} - C_{RX} \beta_{RP} \overline{v}^2 - \overline{R}_X \right\}; \quad (29)$$

$$\frac{d\overline{v}_Y}{dT} = -\frac{1}{C_{\lambda 2}} \overline{v}_X \overline{\Omega}_Z + \frac{N_X}{C_{\lambda 2}} \left\{ \sum_j K_{Pj} \alpha_{jz} \overline{P}_{ej} + C_{RY} \beta_{RP} \overline{v}^2 \pm \sum_h k_h \overline{P}_{Thh} - \overline{R}_Y \right\}; \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\overline{\Omega}_Z}{dT} = & -\frac{N_\Omega}{N_X} C_{\lambda 21} \overline{v}_X \overline{v}_Y + \\ & + N_\Omega \left\{ \sum_j K_{Pj} h_{Pj} \overline{P}_{ej} + C_{RY} \overline{X}_R \beta_{RP} \overline{v}^2 \pm \sum_h k_h \overline{P}_{Thh} h_h + (\overline{M}_{PZ} - \overline{M}_{DZ}) \right\}, \quad (31) \end{aligned}$$

where

$$\overline{R}_X = \left\{ C_{11} \cos 1,5\beta_{dr} - C_{12} \sin^4 1,5\beta_{dr} + C_{13} \left(\frac{2\beta_{dr}}{\pi} \right)^3 \right\} \overline{v}^2 \quad (32)$$

longitudinal component of the water resistance of the ship’s movement;

$$\overline{R}_Y = \left\{ C_{21} \sin 2\beta_{dr} \cos \beta_{dr} + C_{22} \sin^2 \beta_{dr} + C_{23} \sin^4 2\beta_{dr} \right\} \overline{v}^2 \quad (33)$$

transverse component of the water resistance of the ship’s motion;

$$\overline{M}_{PZ} - \overline{M}_{DZ} = \left[C_{61} \sin 2\beta_{dr} + C_{62} \sin \beta_{dr} + C_{63} \sin^3 2\beta_{dr} + C_{64} \sin^4 2\beta_{dr} \right] \overline{v}^2 - C_{65} \overline{\Omega}_Z \overline{v}^2 \quad (34)$$

positional and dynamic components of the turning resistance moment of the vessel;

$\sum_h k_h \overline{P_{Thh}}$ – total propeller thrust of the thrusters;
 $\sum_h k_h \overline{P_{Thh} h_h}$ – total torque from the thruster propellers, relative to the ship's center of gravity;

$$N_X = \frac{L \sum K_{Pj} P_{ej0}}{(m + \lambda_{11}) v_0^2}, \quad N_\Omega = \frac{L^3 \sum K_{Pj} P_{ej0}}{2(J_Z + \lambda_{66}) v_0^2} - \text{dynamic similarity criteria};$$

X_R – distance from the center of the coordinate system to the steering wheel; P_{ej} and K_{Pj} – useful thrust of the propeller and its share in the total thrust, respectively; L – vessel length; m – mass of the vessel; ρ – water specific density;

λ_{11} and λ_{22} – attached masses of water along the X and Y axes; J_Z – ship's moment of inertia during rotation around the Z axis; λ_{66} – attached moment of inertia of water; β_{dr} – drift angle; $\overline{P_{Thh}}$, $\overline{h_h}$ and k_h – the relative thrust, its shoulder, and the share of the thrust of the corresponding thruster propeller, at the maximum step ratio in the total thrust of the propulsive propellers.

Rudder attack angle

$$\beta_{RP} = K_R \beta_R - \chi_C \left(\arctg \beta_{dr} - \varepsilon \frac{\overline{\Omega_Z}}{v} \right), \quad (35)$$

where χ_C – the coefficient of influence of the electric ship's hull and its propellers on the rudder; ε – the value determined by the l_R/L ratio (l_R is the distance between the rudder and the middle frame).

In the process of building the model, dimensionless parameters of the propulsive complex $C_{\lambda 2}$, $C_{\lambda 21}$, $C_{\lambda 2}$, C_{RX} , C_{RY} , C_{11} , C_{12} , C_{13} , C_{21} , C_{22} , C_{23} , C_{61} , C_{62} , C_{63} , C_{64} , C_{65} were obtained (they are calculated according to the ratio given in work [7]). It is these parameters that determine the main indicators of the electric ships' maneuverability, affect the performance of the propulsion electric power plant, the quality of the electric power of the ship's network (and, accordingly, the work of the ship's general consumers).

The transition to generalized dimensionless parameters allows approaching the solution of another important problem. Unfortunately, the processes of interaction of the propulsion and steering complex with the ship's hull have not yet been sufficiently studied, even with regard to stable operation modes. Numerical values of coefficients of forces and moments are obtained mainly from the results of expensive experimental studies in experimental basins regarding propellers of a characteristic type and shape, under certain conditions of water flow around them. For other propellers, under other operating conditions, the values of these coefficients will differ. All this, in addition to the well-known problems of the interaction of the propulsive electric power plants, the propellers and the ship's hull, affects the accuracy of the calculation results.

The transition to a mathematical model in dimensionless units and the detection of generalized dimensionless parameters of the propulsive complex makes it possible to level out this shortcoming to some extent. All research is conducted precisely according to these – generalized parameters. If, in the process of research, the influence of changing the numerical values of these parameters on the behavior of the propulsive complex is analyzed, then in fact it is possible to obtain a set of ready-made solutions

for any variant of their combinations. And if information about a more precise value of some coefficient appears in the future, it is enough to choose a ready-made solution from this totality.

Calculation results. The developed mathematical model of transient modes of operation allows analyzing the behavior of propulsive electric ships during maneuvers. An algorithm and a method for calculating the current values of mode indicators during the execution of various maneuvers by electric ships have been developed. The Runge-Kutta-Merson method is used to solve differential equations of transient processes. Based on the results of the calculation, the main quality indicators of all component parts of the complex are evaluated.

As an example, which confirms the efficiency of the developed model and calculation method, the simulation results of one of the maneuvers characteristic of electric ships are given below. The electric ship “Arcticaborg” was considered, the main technical data of which are presented in Table 2.

Table 2

Basic technical data of “Arcticaborg”

Length of the vessel according to k.v.l., m	65,1
Vessel speed, high school	13
Nominal parameters of heat engines	
Power, kW	2×1950
Rotation frequency, rpm	1000
Nominal parameters of propulsion electric motors	
Power, kW	2×1620 (Azipod)
Thruster	
Power, kW	150

The following maneuver was considered: acceleration of the electric ship on a straight course (with synchronous control of the propulsion electric motors) to a low speed $v = 0,3v_{nom}$ (at such speeds, the work of the thrusters is effective) and the output of the electric ship to circulation due to the inclusion (at the time $T = 15$) of the bow thrusters. The maneuver ends when time $T = 40$ is reached.

As a result of the calculation, the current values of the regime indicators of the complex were obtained. In particular, it is:

- components of vessel speed v_x, v_y and angular velocity of its rotation Ω_z ;
- torque of heat engines M_D , moment of resistance M_G and current I_G of generators;
- current I_M , torque M_M and angular speed of rotation ω_M of propulsion electric motors;
- moment M_{Th} and angular speed of rotation ω_{Th} of Th electric motors.

According to the results of the calculations Fig. 6 shows the trajectories of the ship’s movement on the coordinate plane of unrelated to the ship coordinate system X_1OY_1 (the size of the grid is equal to the length of the ship L), at different values of the coefficient K_{TR} . The trajectories are built using the equations given in [12].

The Fig. 6 shows that with an increase in K_{TR} there is a decrease in the tactical diameter of circulation, extension and direct displacement of the vessel. In particular, the circulation diameter with $D_C = 4L$, with $K_{TR} = 0,15$, decreases to $D_C = 3,5L$, with

$K_{TR} = 0,20$. This indicates that the electric ship will be able to perform the maneuver in a smaller water area, that is, the maneuverability of the vessel improves.

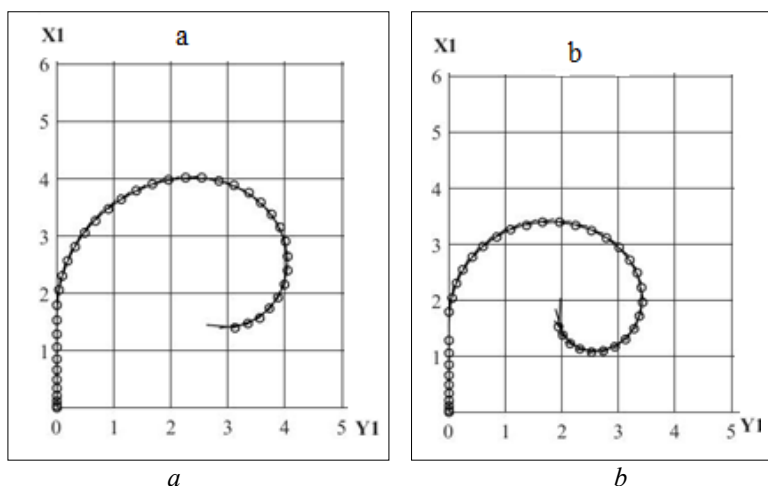


Figure 6 – Trajectory of the vessel movement at:
a – $K_{TR} = 0,15$; b – $K_{TR} = 0,20$

Fig. 7 shows the main operating parameters of the electrical power plant when performing the considered maneuver. The presented results correspond to the variant with $K_{TR} = 0,15$. For ease of understanding, they are grouped into separate drawings for: generator units (M_D, M_G, I_G); propulsion electric motors (I_M, M_M, ω_M); thruster electric motors (M_{Th}, ω_{Th}); vessel (v_x, v_y, Ω_Z). All indicators are given in relative units (the line above the symbols – a sign of relative value – is omitted for the visual relief of the figure).

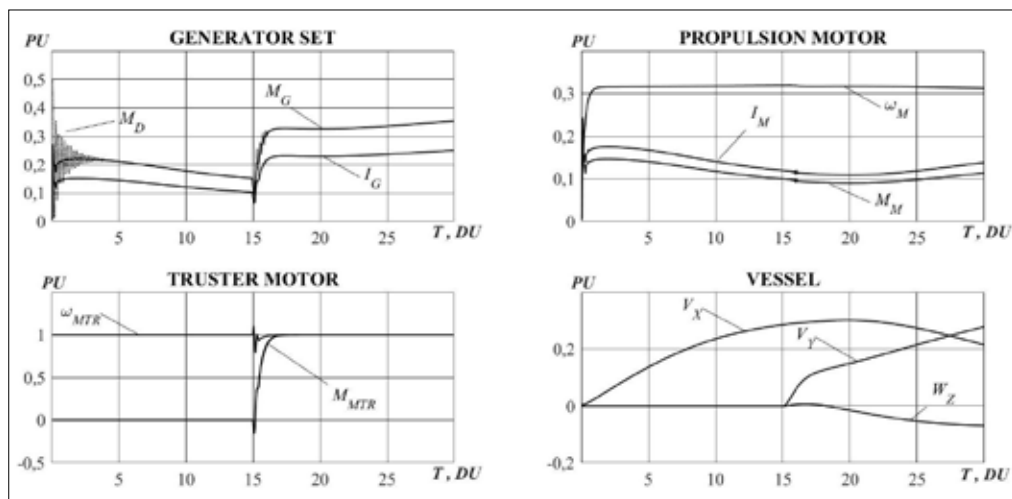


Fig. 7. Current values of mode indicators of the propulsive complex when entering circulation for the $K_{TR} = 0,15$ option.

It can be seen from Fig. 7 that all the main mode indicators of generator units, electric propulsion motors, and thruster electric motors are within the permissible limits, which ensures the guarantee and safety of the maneuver.

Conclusions

A generalized mathematical model of transient modes of electric ships' propulsion complexes with thrusters on maneuvers has been developed. The model allows calculating the current values of the main mode indicators of the component parts of the complex during maneuvers and to evaluate the main indicators of the quality of maneuvering.

The system of dimensionless units, which is the basis of the construction of the model, allows leveling out the uncertainty in the assessment of external factors and the inaccuracy in determining the structural parameters of the complex. The obtained results will be acceptable for a wide class of vessels.

The performance of the developed mathematical apparatus is illustrated by the results of computer simulation of maneuvering modes. The model and the developed calculation method can be used both in the design of modern vessels with electric propulsion, and in the process of their operation to find the best ways to control electric propulsion.

BIBLIOGRAPHY:

1. Yukun Feng, Zuogang Chen, Yi Dai, Lianzheng Cui, Zheng Zhang, Ping Wang. Multi-objective optimization of a bow thruster based on URANS numerical simulations. *Ocean Engineering*, 2022, vol. 247(4):110784. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.110784.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Ionut Cristian Scurtu, Valentin Oncica. 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.
6. 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)*, vol. 16(5):455. doi: 10.15866/iree.v16i5.18132.
7. Xiao Z., Li H., Fang H., Guan Y., Liu T., Hou L., Guerrero J. M. Operation Control for Improving Energy Efficiency of Shipboard Microgrid Including Bow Thrusters and Hybrid Energy Storages. *IEEE Transactions*

- on Transportation Electrification*, June 2020, pp. (99):1-1. doi: 10.1109/TTE.2020.2992735.
8. Kupraty O. 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.
 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., 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.
 13. Яровенко В.А., Черников П.С., Варбанец Р.А., Зарицкая Е.И. Оптимальное управление гребными электродвигателями электроходов при реверсировании. *Електротехніка і електромеханіка*, 2018, № 6, С. 38–46. doi: 10.20998/2074-272X.2018.6.05.
 14. Гофман А.Д. *Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна*. Справочник. Л. : Судостроение, 1988. 360 с.
 15. Яровенко В.А., Черников П.С., Зарицкая Е.И., Шумило А.Н. Управление гребными электродвигателями электроходов при движении по криволинейной траектории. *Електротехніка і Електромеханіка*, 2020, № 5, С. 58–65. doi: 10.20998/2074-272X.2020.5.09

REFERENCES

1. Yukun Feng, Zuogang Chen, Yi Dai, Lianzheng Cui, Zheng Zhang, Ping Wang. (2022). Multi-objective optimization of a bow thruster based on URANS numerical simulations. *Ocean Engineering*, vol. 247(4):110784. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.110784.
2. 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.
3. 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.
4. 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.

5. Ionut Cristian Scurtu, Valentin Oncica. 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.
6. 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)* , vol. 16(5):455. doi: 10.15866/iree.v16i5.18132.
7. Xiao Z., Li H., Fang H., Guan Y., Liu T., Hou L., Guerrero J. M. Operation Control for Improving Energy Efficiency of Shipboard Microgrid Including Bow Thrusters and Hybrid Energy Storages. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, June 2020, pp. (99):1-1. doi: 10.1109/TTE.2020.2992735.
8. Kupraty O. (2021). 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. P. 723. 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. Ph.D. Thesis, NTNU Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
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., Chernikov P.S. (2017). A calculation method of transient modes of electric ships' propelling electric plants. *Electrical engineering & electromechanics*, no. 6, pp. 32-41. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.05.
13. Yarovenko V.A., Chernikov P.S., Varbanets R.A., Zaritskaya E.I. (2018). Optimal control of the electric ships' propulsion motors during reversal. *Electrical engineering & electromechanics*, no. 6, pp. 38-46. doi: 10.20998/2074-272X.2018.6.05.
14. Hoffman A.D. (1988). *Dvizhitel'no-rulevoj kompleks i manevrirovaniye sudna* [Propulsion-steering complex and vessel maneuvering]. Handbook. Leningrad, Shipbuilding Publ., 360 p.
15. Yarovenko, V. A., Chernikov, P. S., Zaritskaya, E. I., Schumylo, A. N. (2018). Control of electric ships' propulsion motors when moving on curvilinear trajectory. *Electrical engineering & electromechanics*, no. 5, pp. 58-65. doi: 10.20998/2074-272X.2020.5.09.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656.13

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.10>

ОЦІНКА ЯКОСТІ ПОСЛУГ В УПРАВЛІННІ МІСЬКИМ ПАСАЖИРСЬКИМ ТРАНСПОРТОМ

Н.М. Арцибашева¹, Т.М. Меленчук², О.В. Ковра³

¹ к.т.н., доцент, доцент кафедри «Автомобільного транспорту та логістики»,
Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-9068-8616

² д.т.н., професор,
професор кафедри «Автомобільного транспорту та логістики»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-9843-3132

³ інженер, старший викладач кафедри «Автомобільного транспорту та логістики»,
Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-2239-7497

Анотація

Вступ У сучасних умовах роль міського пасажирського автомобільного транспорту у загальній транспортній системі м. Одеса неухильно зростає. Автомобільний транспорт забезпечує економію часу пасажирів, розвиває продуктивні сили суспільства, покращує культурно-побутового обслуговування населення. Тому підвищення ефективності використання рухомого складу та підвищення якості обслуговування пасажирів за рахунок раціональної організації комбінованих форм та режимів сполучення на міських автобусних маршрутах транспортної мережі м. Одеса є актуальним. **Мета.** Метою статті є визначення етапів формування системи оцінки якості перевезення пасажирів у містах методом розрахунку інтегрованого показника якості перевезення пасажирів на маршруті міського пасажирського транспорту з урахуванням параметрів технологічного процесу та провести постановку завдання визначення такого рівня якості перевезення, якій би відповідав фінансовим можливостям муніципальної влади. **Результати.** Проектування параметрів транспортного процесу перевезення мешканців міст має бути спрямоване на формування комфортного середовища та розвиток територій. Відповідно щоб особи, які ухвалюють рішення у сфері організації пасажирських перевезень, враховували вплив параметрів перевезень на зміну якості послуг пасажирського транспорту. Проведені дослідження значущості характеристик якості транспортного процесу перевезення пасажирів міським громадським транспортом дозволили встановити найбільш значущі характеристики, які доцільно використовувати під час формалізації показника якості перевезення пасажирів на маршруті міського пасажирського транспорту. Для планування рівня якості на маршрутах міського пасажирського транспорту

доцільно враховувати показники транспортного процесу перевезення населення за можливості транспортних підприємств контролювати досягнутий рівень. Запропонований інтегрований показник якості перевезення пасажирів на маршруті міського пасажирського транспорту включає фактичні та раціональні значення довжини перегону, інтервалу руху, технічна швидкість та кількість пасажирів у салоні транспортного засобу. Для забезпечення необхідного рівня якості, якого муніципальна влада бажає досягти, має проводити відповідне фінансове забезпечення. **Висновки.** У цій статті ми показуємо, що проектування параметрів транспортного процесу перевезення мешканців міст має бути спрямоване на формування комфортного середовища та розвиток територій. Показано, що планування якості процесу перевезення пасажирів має базуватись на параметрах конкретного процесу. Це дозволить муніципальній владі при проведенні вибору перевізників для кожного маршруту враховувати конкретні показники, які вони зможуть забезпечити своїм рухомим складом. Проведені дослідження значущості характеристик якості транспортного процесу перевезення пасажирів міським громадським транспортом. Запропонований інтегрований показник якості перевезення пасажирів на маршруті міського пасажирського транспорту включає фактичні та раціональні значення довжини перегону, інтервалу руху, технічна швидкість та кількість пасажирів у салоні транспортного засобу. Для забезпечення необхідного рівня якості, якого муніципальна влада бажає досягти, має проводити відповідне фінансове забезпечення.

Ключові слова: якість транспортного обслуговування, перевезення, тривалість поїздки, маршрут.

ASSESSMENT OF THE QUALITY OF SERVICES IN THE MANAGEMENT OF CITY PASSENGER TRANSPORT

N.M. Artsybasheva¹, T.M. Melenchuk², O.V. Kovra³

¹ PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department “Motor transport and logistics”,

Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-9068-8616

² Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department “Motor transport and logistics”,

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-9843-3132

³ engineer, Senior Lecturer department at the “Motor transport and logistics”,

Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine,

ORCID ID: 0000-0002-2239-7497

Summary

Introduction In modern conditions, the role of urban passenger road transport in the general transport system of Odesa is steadily growing. Automobile transport saves passengers' time, develops the productive forces of society, and improves the cultural and household services of the population. Therefore, increasing the efficiency of the use of rolling stock and improving the quality of passenger service due to the rational organization of combined forms and modes of communication on city bus routes of the transport network of the city of Odesa is relevant. **Purpose.** The purpose of the article is the determination of the stages of

*the formation of a system for assessing the quality of passenger transportation in cities by the method of calculating the integrated indicator of the quality of passenger transportation on the urban passenger transport route, taking into account the parameters of the technological process, and setting the task of determining such a level of transportation quality that would correspond to the financial capabilities of the municipal authorities. **Results.** Designing the parameters of the transport process of transporting city residents should be aimed at creating a comfortable environment and developing territories. Accordingly, decision-makers in the field of the organization of passenger-fat transportation should take into account the influence of transportation parameters on changes in the quality of passenger transport services. The conducted studies of the significance of the characteristics of the quality of the transport process of transporting fat passengers by city public transport allowed us to establish the most significant characteristics that should be used during the formalization of the indicator of the quality of passenger transportation on the route of urban passenger transport. To plan the level of quality on urban passenger transport routes, it is advisable to take into account the indicators of the transport process of transporting the population, with the ability of transport enterprises to control the achieved level. The proposed integrated indicator of the quality of passenger transportation on the urban passenger transport route includes actual and rational values of the length of the run, the movement interval, the technical speed and the number of passengers in the vehicle cabin. To ensure the necessary level of quality, which the municipal government wants to achieve, it must provide appropriate financial support. **Conclusions.** In this article we show, that the design of the parameters of the transport process of transporting city residents should be aimed at the formation of a comfortable environment and the development of territories. It is shown that planning the quality of the passenger transportation process should be based on the parameters of the specific process. This will allow the municipal authorities to take into account specific indicators that they will be able to provide with their rolling stock when selecting carriers for each route. Studies of the significance of the quality characteristics of the transport process of transporting passengers by city public transport have been conducted. The proposed integrated indicator of the quality of passenger transportation on the urban passenger transport route includes actual and rational values of the length of the journey, the movement interval, technical speed and the number of passengers in the vehicle cabin. In order to ensure the necessary level of quality, which the municipal government wishes to achieve, appropriate financial support must be provided.*

Key words: *quality of transport service, transportation, trip duration, route.*

Вступ

У сучасних умовах роль міського пасажирського автомобільного транспорту у загальній транспортній системі м. Одеса неухильно зростає. Підвищений попит на автомобільні перевезення пасажирів і всі більш зростаючі вимоги до поліпшення якості транспортного обслуговування населення викликають необхідність подальшого вдосконалення системи організації міських автобусних перевезень [1].

Автомобільний транспорт забезпечує економію часу пасажирів, розвиває продуктивні сили суспільства, покращення культурно – побутового обслуговування населення. Нині в населення змінюється характер попиту всі види послуг, зокрема і транспортне обслуговування.

Відповідно до цього необхідний розвиток існуючих форм транспортного обслуговування населення. Якісне обслуговування населення неможливе без надання йому різноманітних транспортних послуг, які можна було б порівняти з його потребами, тобто. транспортне обслуговування передбачає наявність широкого спектра перевізних технологій.

Тому підвищення ефективності використання рухомого складу та покращення якості обслуговування пасажирів на базі раціональної організації комбінованих форм та режимів сполучення на міських автобусних маршрутах транспортної мережі м.Одеса є актуальним.

Постановка проблеми. Мобільність суспільства – один із головних критеріїв ефективності сучасного міста. Не існує такого міста, яке в наш час могло б нормально функціонувати без системи громадського транспорту. З урахуванням реальної ціни мобільності суспільству громадський транспорт, безсумнівно, є найбільш рентабельним засобом досягнення міської мобільності, доступним у своїй всій верстві населення. Більше того, наявність особистого автомобіля вже не гарантує мобільність, і переважна більшість громадян, які проживають у містах, що постійно ростуть, з їх вуличними пробками будуть все частіше вибирати поїздки на громадському транспорті. Поняття потреби у поїздках на міському пасажирському транспорті визначається транспортною рухливістю, тобто. кількістю поїздок, що припадають на одного мешканця. Одночасно з підвищенням рухливості населення продовжується і процес перерозподілу загального обсягу роботи пасажирського транспорту між окремими його видами з величезним переважанням (на даному етапі розвитку) автомобільного. Високий показник обсягу перевезень на автомобільному транспорті створюється головним чином за рахунок автобусних перевезень, на частку яких припадає більше половини пасажирів, що перевозяться всіма видами транспорту [2].

Згідно зі статистичними даними [2] у період 2019–2021 років щорічно міським автомобільним транспортом в Одесі перевозилося близько 100 млн. пасажирів. При цьому пасажиропробіг міського автомобільного транспорту цього триріччя становив близько 4 млрд пас. км.

Підвищений попит на автомобільні перевезення пасажирів і всі більш зростаючі вимоги до поліпшення якості транспортного обслуговування населення викликають необхідність подальшого вдосконалення системи організації міських автобусних перевезень.

У сучасних ринкових умовах пропонується запроваджувати споживчу оцінку якості сфери послуг. Споживачів послуг міського пасажирського транспорту – пасажирів залучають: мінімальний час доставки; максимальна безпека; надійність перевезень; регулярність руху автобусів; гарантований час роботи автобусів на маршруті; наявність додаткових послуг; наявність різних рівнів транспортного обслуговування; пристосовність до вимог клієнтів (гнучкість обслуговування); зручність, комфорт; налагоджена система інформації; прийнятна вартість перевезення. Планування якості технологічного процесу перевезення пасажирів повинно базуватися на даних щодо значущості характеристик якості, що дасть можливість муніципальній владі при проведенні вибору перевізників для кожного маршруту враховувати конкретні показники, які вони зможуть забезпечити своїм рухомих складом [3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Ступінь задоволення потреб населення у пересуванні впливає як на економіку, так і на соціальні відносини, тому велике значення має якість пасажирських перевезень. При розгляді питання оцінки якості послуг міського пасажирського транспорту (МПТ) необхідно врахувати такі положення: потреби споживачів транспортних послуг повинні бути встановлені та визначено за допомогою маркетингових досліджень; необхідно періодичне проведення маркетингових досліджень та перегляду вимог до послуг, що надаються; потреби зазвичай виражаються у властивостях та кількісних характеристиках цих властивостей; сукупність очікуваних споживачем параметрів якості необхідної йому послуги та їх значення, що задовольняють запити споживача, становлять цінність послуги, що надається [4].

Аналіз досліджень, пов'язаних з оцінкою якості міського пасажирського транспорту [5] показав, що формування параметрів ефективності функціонування міського пасажирського транспорту проводиться зазвичай у залежності від конкретно поставленої мети та розв'язуваних завдань. Ці завдання різні, наприклад: – оцінка якості роботи підприємств та організацій МПТ; оцінка роботи водіїв та бригад; оцінка якості маршрутної мережі та інші. Вибрані при цьому показники оцінки якості, як правило, характеризують ефективність стану та розвитку елементів системи МПТ і не відображають вимоги пасажирів до рівня транспортного обслуговування, тоді як основне завдання роботи МПТ полягає у забезпеченні якісного обслуговування населення [6].

Для врахування інтересів учасників ринку пасажирських транспортних послуг та вдосконалення економічних відносин у сфері перевезень пасажирів доцільно вирішувати такі завдання: досягнення балансу інтересів пасажирів та перевізника, що забезпечує доступність пасажирських послуг для користувачів; ефективне функціонування перевізника; повне відшкодування витрат підприємств міського пасажирського транспорту, пов'язаних із здійсненням перевезень пасажирів; створення умов, необхідних для залучення приватних інвестицій у цілях підвищення економічної ефективності процесу перевезення пасажирів [7].

Дослідники визначають, що при впровадженні системи якості великою проблемою для перевізників, органів контролю і мешканців міст є відсутність розробленої єдиної методології оцінки якості перевезення пасажирів. Збільшення конкуренції у сфері надання пасажирських транспортних послуг призводить до боротьби за обсяги перевезень, вимагає висування нових вимог до надання послуг у сфері транспортного обслуговування. Внаслідок цього, обґрунтування факторів оцінки якості послуг перевізників є одним з кроків до підвищення конкурентоспроможності перевезень пасажирів [8]. При цьому, на проблему забезпечення якості пасажирських перевезень впливає ряд негативних факторів: низьке фінансування державних програм розвитку транспорту і дорожнього господарства, нівелювання вимог та підходів до утримання доріг; недосконалість та незавершеність структурних реформ в галузі пасажирських перевезень; збитковість підприємств міського пасажирського транспорту внаслідок недостатньої компенсації витрат коштів на перевезення пільгових категорій пасажирів, застарілий рухомий склад; перевантаженість міських доріг, незадовільна система містобудівництва та утримання транспортної інфраструктури; недостатній обсяг залучення коштів

на розвиток транспорту; застаріла нормативно-правова база, низький темп гармонізації вітчизняного транспортного законодавства до міжнародних вимог; слабка конкуренція між перевізниками щодо забезпечення саме комфортності перевезення пасажирів [3,4]. Організаційні рішення з підвищення ефективності роботи міського пасажирського транспорту, які є ефективними з економічної точки зору, далеко не завжди є найкращими в соціальному плані. Висока економічна ефективність роботи пасажирського транспорту в деяких випадках може призвести до таких негативних соціальних результатів, як зменшення вільного часу населення, зниження якості перевезень, погіршення екологічної ситуації тощо [4]. Дослідники виділяють фактори, які із соціальної точки зору мають особливе значення: повне і своєчасне задоволення потреб населення в перевезеннях, прискорення пересування пасажирів, створення необхідного комфорту поїздки, здійснення заходів, що забезпечують безпеку руху і зменшення рівня забруднення навколишнього середовища, підвищення регулярності й частоти руху транспортних засобів [6]. В теперішній час пропонуються різноманітні методи визначення показника якості міського пасажирського транспорту [9]. Таким чином, запропоновані одиничні та комплексні показники якості враховують параметри перевезення пасажирів. Однак, для планування якості технологічного процесу перевезення пасажирів доцільно як показники використовувати параметри даного процесу [10]. Це дасть можливість муніципальній владі при проведенні вибору перевізників для кожного маршруту враховувати конкретні показники, які перевізники зможуть забезпечити своїм рухомим складом. Крім того, доцільно враховувати можливість додаткового фінансування транспортних підприємств для компенсації витрат на досягнення рівня якості, якого вимагає влада міста.

Мета статті є визначення етапів формування системи оцінки якості перевезення пасажирів у містах методом розрахунку інтегрованого показника якості перевезення пасажирів на маршруті міського пасажирського транспорту з урахуванням параметрів технологічного процесу.

Для її досягнення необхідно вирішити такі завдання: формування характеристик якості; визначити параметри технологічного процесу, що впливають на рівень якості транспортного обслуговування; сформувати загальний вид інтегрованого показника якості; провести постановку завдання визначення такого рівня якості перевезення, якій би відповідав фінансовим можливостям муніципальної влади.

Виклад основного матеріалу. Для визначення значущості характеристик якості міського пасажирського транспорту проводилось натурне обстеження, для чого використовувався анкетний метод на підприємствах міського пасажирського транспорту м. Одеса. Було проведено опитування серед користувачів міського пасажирського транспорту, які показники, за їх думкою, впливають на якість обслуговування. Спостерігачі оцінювали параметри за шкалою від найбільш значущого до найменш значущого.

На першому етапі було проведено визначення факторів, які, за думкою пасажирів, впливають на якість обслуговування.

На наступному етапі було розроблено анкету, за допомогою якої можливо проведення експертної оцінки значущості показників транспортного процесу, як показників якості.

На третьому етапі було проведено обробку результатів обстеження. Оцінку статистичних даних опитування було проведено за допомогою коефіцієнта конкордації Кендела:

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2 \cdot (n^3 - n)}, \quad (1)$$

де W – коефіцієнт конкордації Кендела; m – кількість експертів; n – кількість факторів; S – сума квадратів відхилення, що визначається таким чином:

$$S = \sum_{j=1}^n (X_j - X_{cp})^2, \quad (2)$$

де X_j – сума рангів по j – му фактору; X_{cp} – середня сума рангів, що визначається таким чином:

$$X_{cp} = \frac{\sum_{j=1}^n X_j}{n}. \quad (3)$$

Перевірка статистичної ваги коефіцієнта конкордації проводилась шляхом визначення емпіричного значення критерію Пірсона за такою залежністю:

$$\zeta^2 = \frac{12 \cdot S}{m \cdot n \cdot (n+1)}. \quad (4)$$

Отримані результати наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Значення рангів характеристик якості

Номер фактору	Найменування фактору	Сума рангів по фактору	Середня сума рангів
1	Тривалість поїздки	540	2176,9
2	Кількість пасажирів в салоні автобусу	1787	
3	Ввічливість водія та кондуктора	2248	
4	Безпека перевезень	1146	
5	Тривалість пішохідної складової пересування	1782	
6	Пересадочність при пересуванні	1612	
7	Тривалість очікування автобусу	924	
8	Стан траси маршруту	2742	
9	Чистота автобусу	2832	
10	Облаштування пунктів посадки пасажирів	2965	
11	Система інформування пасажирів	2926	
12	Вид плати за поїздку	3415	
13	Конструкція автобусу	3381	

З аналізу отриманих результатів (табл. 1), можна зробити висновок, що найважливішою характеристикою якості є тривалість поїздки. Цей фактор важливий для пасажирів, оскільки визначає своєчасне прибуття до місця.

Наступною значною характеристикою якості перевезень визначено тривалість очікування автобуса. Третьою важливою характеристикою, як показало дослідження, є безпека перевезень. Тому що дістатися до пункту призначення з мінімальним ризиком для життя та здоров'я є одним із критеріїв якості обслуговування пасажирів. Пересадочність при пересуванні є наступним за значимістю фактором, пов'язаним з економією часу, що дуже важливо при поїзді до місця.

П'ятим важливим фактором, що впливає на якість обслуговування пасажирів на міському пасажирському транспорті, є тривалість пішохідної складової пересування, яка пов'язана із витратою часу на пересування.

Наступною важливою характеристикою є кількість пасажирів у салоні автобуса. Велика кількість пасажирів може призвести до відмови у посадці, що, в свою чергу, впливає на збільшення тривалості очікування автобуса та поїздки.

Сьомою за значимістю характеристики якості перевезення пасажирів є ввічливість водія та кондуктора. Адже від того, наскільки ввічливо, коректно і позитивно поводить ся обслуговуючий персонал, надалі залежить морально-психологічний стан людини.

Стан траси маршруту є наступною характеристикою оцінки якості перевезень. Адже від стану доріг залежить швидкість руху автобуса, яка, своєю чергою, впливає на безпеку перевезень.

За результатами розрахунків, такою важливою характеристикою є чистота автобуса, оскільки вона впливає на комфортність поїздки.

Найменш значущими характеристиками якості поїздок є система інформування пасажирів, конструкція автобуса та вид плати за проїзд.

Проведене дослідження дозволяло зробити висновок, що фактори, які були вказані в опитуванні, можна використовувати при оцінці якості обслуговування.

Для подальшого вивчення оцінки якості перевезення пасажирів необхідно виробити інтегрований показник якості перевезення пасажирів маршрутом міського пасажирського транспорту (МПТ).

Інтегрований показник має враховувати параметри транспортного процесу, що впливають на умови перевезення пасажирів. Загалом, відповідно до рангів характеристик якості (табл. 1), було обрано такі характеристики: час пішохідного підходу від дверей пункту відправлення до зупинного пункту міського пасажирського транспорту, час очікування транспорту на зупиночному пункті, час руху на транспорті та час пішохідного підходу від зупинного пункту міського пасажирського транспорту до дверей пункту призначення.

З обраних чинників, які впливають на рівень якості обслуговування пасажирів, транспортне підприємство з організацією процесу перевезення може проводити довжину перегону маршруту, інтервал руху на маршруті і швидкість сообщення.

Крім того, на рівень якості обслуговування пасажирів впливають умови перевезення, що визначаються значенням коефіцієнта використання ємності транспортного засобу, що відповідає характеристиці «Кількість пасажирів у салоні автобусу», яка стала шостою за значимістю (табл.1). Значення даного коефіцієнта залежить від кількості та місткості транспортних засобів, що працюють на маршруті.

Таким чином, інтегрований показник якості перевезення пасажирів на маршруті міського пасажирського транспорту має враховувати параметри технологічного процесу перевезення пасажирів та може бути формалізований наступним чином:

$$I \cdot \square_{I'} = \left(\frac{I_{n_{\min}}}{I_{n_D}} \right)^{x_1} \cdot \left(\frac{I_{\min}}{I_D} \right)^{x_2} \cdot \left(\frac{V_{T_D}}{V_{T_{\max}}} \right)^{x_3} \cdot \left(\frac{q_c}{q_D} \right)^{x_4} \quad (5)$$

де x_1, x_2, x_3, x_4 – показники, що характеризують вагомість відповідного показника якості; $I_{n_{\min}}$ – мінімальна довжина перегону, км; I_{n_D} – фактична довжина перегону, км; I_{\min} – мінімальний інтервал руху, хв; I_{ϕ} – фактичний інтервал руху, хв; V_{T_D} – технічна швидкість км/год; $V_{T_{\max}}$ – максимальна технічна швидкість км/год; q_c – кількість місць для сидіння пасажирів в салоні транспортного засобу, пас; q_D – середня фактична кількість пасажирів в салоні транспортного засобу, пас.

Для практичної реалізації залежності (5) потрібне встановлення значень показників, що характеризують значущість відповідного показника якості. Це можна зробити шляхом оцінки значущості кожного чинника пасажирів міського транспорту.

За використання залежності (5) можливе проведення формування системи оцінки якості перевезення пасажирів у містах.

Підвищення якості перевезення пасажирів можливе за рахунок визначення раціональних значень довжини маршруту, інтервалу руху, технічної швидкості та місткості транспортних засобів, що працюють на маршруті. При цьому міські транспортні підприємства організують перевезення мешканців із метою отримання прибутку. У результаті підвищення якості цього процесу має зменшувати доходи транспортних підприємств. Це можна формалізувати так [1]:

$$\Pi = D - B \rightarrow \max, \quad (6)$$

де D – доходи транспортних підприємств від перевезень пасажирів у місті, грн.; B – витрати транспортних підприємств на організацію перевезення пасажирів у місті, грн.

Доходи підприємств можна визначати таким чином [8]:

$$D = Q \cdot T, \quad (7)$$

де Q – обсяг перевезень на маршруті, пас.; T – величина тарифу на перевезення, грн/пас.

Величина тарифів на перевезення пасажирів устанавлюється на підставі собівартості за такою формулою [9]:

$$T = S \cdot (1 + R), \quad (8)$$

де S – собівартість перевезень, грн/пас; R – коефіцієнт рентабельності перевезень.

Витрати транспортних підприємств на організацію перевезень визначаються таким чином [9]:

$$B = Q \cdot S, \quad (9)$$

При цьому обсяг перевезень є функцією від тарифу:

$$Q = f(T). \quad (10)$$

Однак підвищення тарифу призводить до зменшення обсягів перевезень пасажирів та, як наслідок, зменшення доходів від перевезень. У цьому залежність якості перевезення пасажирів від витрат за його виконання носить нелінійний характер (рис. 1).

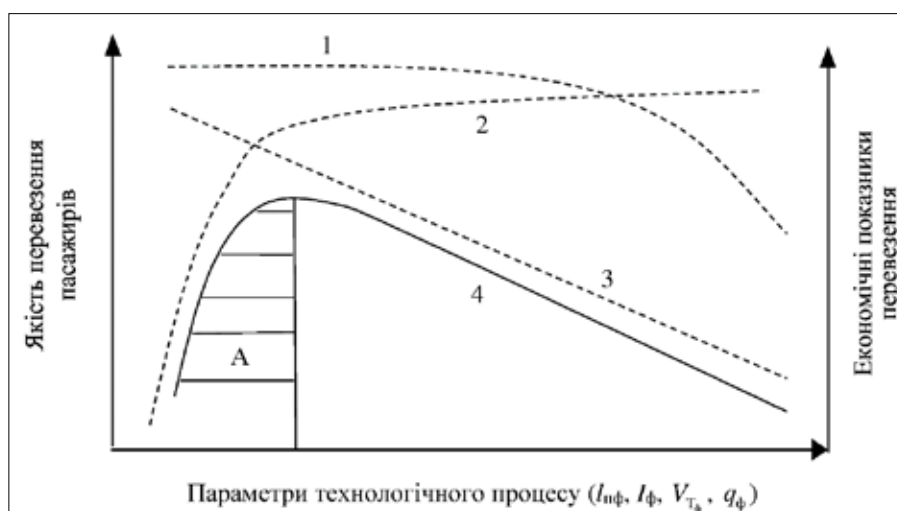


Рис. 1. Залежність якості та економічних показників перевезення пасажирів від параметрів технологічного процесу: 1 – інтегрований показник якості; 2 – доходи транспортних підприємств; 3 – витрати транспортних підприємств; 4 – прибуток транспортних підприємств; А – зона зменшення прибутку транспортних підприємств.

Організація транспортного обслуговування пасажирів повинна бути орієнтована на задоволення потреб мешканців міст у потребах транспорту відповідно до необхідних норм часу, комфортності, вартості та безпеки. Тому необхідно, щоб особи, які приймають рішення щодо визначення параметрів технологічного процесу перевезення пасажирів, усвідомлювали вплив даних параметрів на показники якості транспортного обслуговування мешканців міст.

Так, наприклад, для кожного маршруту з певними параметрами є раціональна кількість автотранспортних засобів, що забезпечує максимальну ефективність роботи ГПТ. Але досягнення раціональних значень параметрів технологічного процесу є можливим за рахунок додаткового фінансування транспортних підприємств. Додаткове фінансування можливе за рахунок державних дотацій або шляхом визначення відповідного тарифу, який компенсує додаткові витрати на підвищення якості.

Існуючий стан економічного розвитку країни не дозволяє перевізникам розраховувати на додаткові державні дотації. У результаті реально транспортні підприємства можуть отримувати додаткове фінансування підвищення якості транспортного обслуговування лише з допомогою підвищення тарифу на перевезення.

Як видно із залежностей (7) та (9) величина доходів та витрат визначається виходячи із значень обсягу перевезень пасажирів.

Однак підвищення тарифу призводить до зменшення обсягів перевезень пасажирів та, як наслідок, зменшення доходів від перевезень.

Тому прибутки транспортних підприємств мають компенсуватися муніципальною владою для забезпечення відповідної якості перевезення. Внаслідок цього система оцінки якості перевезення пасажирів у містах повинна враховувати можливість муніципальної влади фінансово забезпечувати рівень якості, якого вона бажає досягти.

Це має бути враховано при розробці системи оцінки якості перевезення пасажирів у містах, яка крім вимог до рівня якості повинна включати величину фінансових витрат на досягнення відповідного рівня якості.

Наведена концепція визначення розміру додаткового фінансового забезпечення перевізників муніципальною владою дозволяє розробити систему оцінки якості перевезення пасажирів у містах, де разом із вимогами якості перевезення пасажирів було наведено розмір додаткового фінансування перевізників для його забезпечення.

Висновки. Проектування параметрів транспортного процесу перевезення мешканців міст має бути спрямоване на формування комфортного середовища та розвиток територій. Відповідно до цієї передумови необхідно, щоб особи, які ухвалюють рішення у сфері організації пасажирських перевезень, враховували вплив параметрів перевезень на зміну якості послуг пасажирського транспорту. Існуючі методи оцінки якості перевезення пасажирів як параметри використовують складові витрат часу пасажирів на пересування та показники умов цього пересування. Однак планування якості процесу перевезення пасажирів має базуватись на параметрах конкретного процесу. Це дозволить муніципальній владі при проведенні вибору перевізників для кожного маршруту враховувати конкретні показники, які вони зможуть забезпечити своїм рухомим складом.

Проведені дослідження значущості характеристик якості транспортного процесу перевезення пасажирів міським громадським транспортом дозволили встановити найбільш значущі характеристики, які доцільно використовувати під час формалізації показника якості перевезення пасажирів на маршруті міського пасажирського транспорту.

Для планування рівня якості на маршрутах міського пасажирського транспорту доцільно враховувати показники транспортного процесу перевезення населення за можливості транспортних підприємств контролювати досягнутий рівень.

Запропонований інтегрований показник якості перевезення пасажирів на маршруті міського пасажирського транспорту включає фактичні та раціональні значення довжини перегону, інтервалу руху, технічна швидкість та кількість пасажирів у салоні транспортного засобу. Для забезпечення необхідного рівня якості, якого муніципальна влада бажає досягти, має проводити відповідне фінансове забезпечення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Доля В. К. Пасажирські перевезення : монографія. Харків : Видавництво Форт, 2011. 504 с.
2. ДЕРЖАВНА СЛУЖБА СТАТИСТИКИ УКРАЇНИ (ДССУ). – Головне управління статистики в Одеській області, Статистичний щорічник Одеської області / за редакцією Котвицької Людмили Едуардівни ; відп. за випуск: Патлаченко Людмила Андріївна. Одеса, 2019.
3. Меленчук Т.М., Кірілюк Є.В. До питання формування системи оцінки якості перевезення пасажирів у містах. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. Луцьк : Луцький НТУ, 2020. Вип. 2 (15). С. 72–78.

4. Кужель В. П., Іщенко А. П., Бишко М. О. Визначення рівня якості пасажирських перевезень з позиції пасажира. 2013. URL: <http://atm.vntu.edu.ua/articles/12.pdf>.
5. Біліченко В. В., Цимбал С. В., Мирниця А. В. Вдосконалення міських пасажирських перевезень шляхом застосування експресного режиму руху. 2014. URL: <http://atm.vntu.edu.ua/articles/2014/68.pdf>.
6. Лежнева О. І. Рациональна організація руху на маршрутах міського пасажирського транспорту. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків : НТУ «ХП», 2014. Вип. 17 (1060). С. 37–42.
7. Павлюк А. В. Ідентифікація методів державного регулювання ринку послуг автомобільного транспорту в регіоні. *Вісник НАДУ*. 2015. Вип. 4. С. 78–86.
8. Арцибашева Н.М., Меленчук Т.М., Ілько О. Підвищення ефективності роботи транспортних підприємств за рахунок використання інноваційних інформаційних технологій в логістиці. *Інтелектуальні системи та інформаційні технології* : матеріали міжнар. наук. конф. Одеса, 2019. С. 132–135.
9. Доля В. К., Давідіч Ю. О., Григорова Т.М., Ергономічні і логістичні аспекти в транспортних системах: монографія. Харків : Лідер, 2015. 196 с.
10. Давідіч Н.М. Моніторинг впливу параметрів системи міського пасажирського транспорту на якість обслуговування населення. *Комунальне господарство міст. Серія «Технічні науки та архітектура»*, 2016. Вип. 128. С. 89–93.

REFERENCES

1. Dolya V. K. (2011) Passenger transportation [Pasazhyrski perevezennya]. Kharkiv, 504.
2. STATE STATISTICAL SERVICE OF UKRAINE (DSSU). (2019) – Main Department of Statistics in Odesa Oblast, Statistical Yearbook of Odesa Oblast. Edited by Lyudmila Eduardivna Kotvytska – Responsible for publication: Lyudmila Andriivna Patlachenko. Odesa.
3. Melenchuk T.M., Kirilyuk E.V. (2020) To the feeding of the system of ocinky yakosti transported pasaghiriv at the places [Do pinannya formuvannya sistemi yakosti perevezennya pasazhyrov v mistax]. Scientific journal Lutsk National Technical University, 2 (15), 72–78.
4. Kuzhel, V. P., Ishchenko, A. P., Byshko, M. O. (2013) Determination of the level of quality of passenger transport from the position of the passenger [Vyznachennya rivnya yakosti pasazhyrskykh perevezen z pozytsiyi pasazhyra] URL: <http://atm.vntu.edu.ua/articles/12.pdf>.
5. Bilichenko, V. V., Tsymbal, S. V., Myrnytsya, A. V. (2014) Improvement of urban passenger transportation by using express mode of traffic [Vdoskonalennya miskykh pasazhyrskykh perevezen shlyakhom zastosuvannya ekspresnoho rezhymu rukhu]. URL: <http://atm.vntu.edu.ua/articles/2014/68>.

6. Lezhneva, O. I. (2014) Rational organization of traffic on urban passenger transport routes [Ratsionalna orhanizatsiya rukhu na marshrutakh miskoho pasazhyrskoho transportu]. *Bulletin of Kharkiv National Technical University*, 17 (1060), 37–42.
7. Pavlyuk, A. V. (2015) Identification of methods of state regulation of the car transport services market in the region [Identyfikatsiya metodiv derzhavnoho rehulyuvannya rynku posluh avtomobilnoho transportu v rehioni]. *Bulletin of NADU*, 4. 78–86.
8. Artsybasheva N.M., Melenchuk T.M., Ilko O.C. (2019) Increasing the efficiency of the work of transport enterprises due to the use of innovative information technologies in logistics [Pidvyshchennia efektyvnosti roboty transportnykh pidpriemstv za rakhunok vykorystannia innovatsiinykh informatsiinykh tekhnolohii v lohistytsi] *Collection of scientific papers inter. conf. “Intelligent systems and information technologies”*, Odesa, 132–135.
9. Dolya V.K., Davidich Yu.O., Grigorova T.M. (2015) Ergonomic and logistic aspects in transport systems [Ergonomicni i logisticni aspekti v transportnix sistemach]. *Kharkiv*, 196.
10. Davidich N.M., Chumachenko I.V. (2016) Monitoring the influence of parameters of the urban passenger transport system on the quality of public service [Monitoring vplivu parametriv sistemi viskova pasazhyrskogo transportu na yakist obslugovanya naselenya]. *Scientific works of Kharkiv National Technical University*, 128, 89–93.

**ПОШУК БЕЗПЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ
ПЛАВАЮЧИХ МІН МЕТОДАМИ КІНЕМАТИЧНОГО
ПРОЕКТУВАННЯ**

**І.С. Афтаназів¹, Л.І. Шевчук², Р.З. Стоцько³, І.Г. Свідрак⁴,
О.І. Строган⁵, Л.Р. Струтинська⁶**

¹д.т.н., професор кафедри «Нарисної геометрії та графіки»,
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-3484-7966

²д.т.н., професор кафедри «Технологія органічних речовин»,
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-3484-7966

³к.арх.н., доцент, зав. кафедри «Нарисної геометрії та графіки»,
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

⁴к.т.н., доцент, кафедри «Нарисної геометрії та графіки»,
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

⁵к.т.н., ст. викладач, кафедри «Нарисної геометрії та графіки»,
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-1790-6736

⁶к.е.н., доцент, кафедри «Менеджменту персоналу та адміністрування»,
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-0401-5475

Анотація

Розглянуто актуальне для Європи на період активного розгортання на її території воєнних протистоянь питання розмінування морських рейдів та портів. Запропоновано поєднати пошукові можливості безпілотних літальних апаратів із спроможністю до розмінування плавучих мін катерів-тралівників. Запропонована оптимальна траєкторія пошукових переміщень літальних апаратів по спіралі Архімеда. Визначено доцільну кількість літальних апаратів, що одночасно здійснюють пошуки плавучих мін.

Переміщення пошукових літальних апаратів по спіралі Архімеда рекомендовано із міркувань відсутності в такій траєкторії польотів стрімких поворотів та зворотно-поступальних рухів, які не бажані для літальних апаратів. При цьому усувається і небезпека наявності не обмежених дронами ділянок поверхні водойми чи моря.

Як один із найдієвіших варіантів знешкодження мін запропоновано їх підривання боєзарядами, скинутими із літального безпілотника-ліквідатора.

Для уточнення координат розташування мін на водному плесі пропонується застосування методики кінематичного проектування. Ця методика передбачає формування трьома дронами базової площини та призначення у товщі морських глибин «картинної» площини проекцій, на яку проектуватиметься рухомий об'єкт проектування. У даному випадку в якості об'єкту проектування слугує розшукувана плавуча дрейфуюча міна. Застосування методики кінематичного проектування та дистанційного керування дронів для пошуку плаваючих мін дозволяє

не тільки здійснювати пошукові роботи безпосередньої участі в пошуках людей, а і підвищити продуктивність та швидкість пошукових робіт.

Для керування пошуковими переміщеннями літальних апаратів, для опрацювання наданих ним даних про виявлену міну, для уточнення координат плавучої міни запропонована відповідна блок-схема комп'ютерної програми.

Встановлено, що при швидкостях просторових переміщень пошукових літальних апаратів 5÷5,5 м/с, використовуючи запропоновану схему пошуку, можна щогодинно обстежувати до 6 квадратних кілометрів акваторії моря. При цьому можна зекономити до 20 літрів вартісного палива завдяки зменшенню переміщень катера-тралівника.

Ключові слова: плавуча міна, розмінування, катер-тралівник, літальний апарат, безпілотник, дрон, координати, пошук.

SEARCH OF FLOATING MINES BY UNMANNED AERIAL VEHICLES USING KINEMATIC PROJECTION METHODS

I.S.Aftanaziv¹, L.I. Shevchuk², R.Z. Stotsko³, I.H. Svidrak⁴,
O.I. Strohan⁵, L.R.Strutynska⁶

¹Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department
“Geometry and Engineering Graphics”
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-3484-7966

²Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department “Organic Products Technology”
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-3484-7966

³PhD of Arch. Sciences, chief Professor of the Department
“Geometry and Engineering Graphics”
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,

⁴PhD of Technical Sciences, Professor of the Department
“Geometry and Engineering Graphics”
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,

⁵PhD of Technical Sciences, Assistant of the Department
“Geometry and Engineering Graphics”
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-1790-6736

⁶PhD, Associate Professor of the Department
“Human Resource Management and Administration”
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-0401-5475

Summary

The issue of demining sea raids and ports, which is relevant for Europe during the period of active deployment of military confrontations on its territory, is considered. It is proposed to combine the search capabilities of unmanned aerial vehicles with the ability to clear floating mines of trawler boats. The optimal trajectory of search movements of aircraft along the Archimedean spiral is proposed. An appropriate number of aircraft that search for floating mines at the same time has been determined.

The movement of search aircraft along the Archimedean spiral is recommended due to the absence of sharp turns and back-and-forth movements in such a flight path, which

are undesirable for aircraft. At the same time, the danger of the presence of areas of the surface of the water body or sea that are not limited by drones is also eliminated.

As one of the most effective options for the disposal of mines, their detonation with warheads dropped from an aerial liquidator drone has been proposed.

In order to clarify the coordinates of the location of mines on the water pool, it is proposed to use the kinematic design method. This technique involves the formation of a base plane by three drones and the designation of a "picture" projection plane in the depth of the sea, on which the moving projecting object will be projected. In this case, the wanted floating drifting mine serves as the design object. The use of kinematic design and remote control of drones to search for floating mines allows not only to carry out search operations with direct participation in the search for people, but also to increase the productivity and speed of search operations.

To control the search movements of aircraft, to process the data provided by them about the detected mine, to specify the coordinates of the floating mine, a corresponding block diagram of the computer program is proposed.

It was established that at speeds of spatial movements of search aircraft of $5\div 5.5$ m/s, using the proposed search scheme, it is possible to survey up to 6 square kilometers of sea water area every hour. At the same time, it is possible to save up to 20 liters of valuable fuel due to the reduction of movements of the trawler boat.

Key words: *floating mine, mine clearance, trawler boat, aircraft, drone, drone, coordinates, search.*

Слід відзначити, що впродовж останніх десятиліть, завдяки використанню на етапах проектно-розрахункових робіт унікальних можливостей сучасної обчислювальної комп'ютерної техніки, здійснено великий і відчутний крок у вдосконаленні військової техніки. І основна тенденція, що прослідковується практично у всіх напрямках та сферах військової техніки та озброєння, полягає у зведенні до мінімуму участі людини в процесах налаштування та використання озброєння.

Не обминула ця особливість новітніх озброєнь і військово-морські сили розвинутих країн світу. Зокрема і в галузі мінування та розмінування морських шляхів та акваторій портів. Новітні матеріали та вибухові речовини, сучасні можливості сприйняття, опрацювання та реагування на електромагнітні, акустичні та шумові збурення морської поверхні кораблями чи підводними човнами, перетворюють мінування на грізну зброю активного реагування. Так сучасні донні міни можуть у потрібні моменти часу за дистанційною командою спливати на поверхню (модель MN103-донна неконтактна міна) чи торпедувати (модель Mark 60 Caprot) кораблі противника.

Звичайно із вдосконаленням мінного озброєння вдосконалюються і технічні засоби розмінування як окремих мін, так і мінних полів. Тут безпеці людей, що знешкоджують міни, приділено особливу увагу. І як найефективніший метод захисту особового складу визнається дистанційне керування роботизованими технічними засобами розмінування. Тому було розроблено і впроваджено у практичне застосування дистанційно керовані безпілотні підводні розмінувальні пристрої (проект для ВМС США Proteus). Широко використовують і так звані торпедо-роботи «кемікадзе», що виявивши глибинну чи дону міну зближуються

з нею і вибухають. Вибух торпеди-робота «кемікадзе» завдяки детонації або механічному ушкодженню провокує вибух глибинної міни. Тим самим нейтралізується небезпека підриву цією міною кораблів чи інших плавучих засобів.

Звичайно і надалі широко застосовують для розмінування і протравлювання поверхні моря спеціальні катери-тралівники. Історія використання катерів-тралівників для знешкодження плаваючих та якірних мін сягає майже століття. Започаткування їх використання практично співпадає із періодом початку активного мінування морських водойм. Однак на теперішній час навіть такий давній метод розмінування зазнає модернізації та вдосконалення. Ці вдосконалення полягають у оснащенні тралівників безпілотними плавучими та літальними апаратами для пошуків мін та зарядами із дистанційним керуванням для їх підривання.

Поряд з тим вдосконалюються і інші методи пошуків. Яскравим прикладом успішного використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для пошуків мін є розроблена українським Державним науково-дослідним інститутом випробувань і сертифікації озброєння і військової техніки методика пошуку підвішеними до цих апаратів магнітометричними давачами. Літальний апарат із підвішеними на тросах магнітометричними давачами на висоті 10-15 метрів від поверхні землі здійснює польоти по заданій траєкторії. Сигнал від давача про виявлену міну передається на командний пункт, де опрацьовується з метою визначення точних координат виявлених мін. Забезпечувана точність визначення координат мін калібру 82 та 120 міліметрів тут сягає розбіжності лише у декілька сантиметрів [1]. Даний метод пошуку мін магнітометричними давачами, що підвішені до БПЛА, міг би з успіхом використовуватися і для пошуку плавучих на водній поверхні мін. Однак такі дослідження ще не проводились.

Слід відзначити, що на відміну від якірних та донних мін, встановлення яких неодмінно супроводжується фіксацією місць закріплення на відповідних картах мінування тої чи іншої морської акваторії, розміщення плавучих мін не фіксується і постійно видозмінюється вітрами та течіями, а також хвилювими збуреннями морської поверхні. Більше того, навіть виявлена але вчасно не знешкоджена плавуча міна зберігає небезпеку, оскільки не фіксується на місці виявлення і продовжує переміщатися у воді.

Певну небезпеку плавучі міни становлять не тільки для кораблів а і для цивільного населення на морських побережжях. Прибиті хвилями до мілин берегової лінії ці міни можуть вибухати навіть від ударного контакту із морським дном берегової мілини. І їх вибухи на берегових мілинах загрожують життю та здоров'ю працюючих чи відпочиваючих на побережжі людей. Саме така прикра подія, що забрала життя одної людини і важко травмувала іншу трапилася на морському березі поблизу міста Одеса (Україна) в червні 2022 року. Зірвану з якоря міну, що була встановлена російськими військовими для блокування портів Одеси, відірвало від якоря і прибило хвилями до берега морського пляжу. І саме її вибух став причиною смерті та тяжких травм людей. Схожа ситуація, що супроводжувалась смертю людини, тут повторилась і у липні місяці цього ж року.

То ж плавучі міни не лише створюють перешкоди та небезпеку для судноплавства, а і загрожують життю і здоров'ю людей. А згідно даних пресслужби Військово-морських сил України лише за чотири перші місяці російської агресії

військами Російської Федерації у води Чорного моря було встановлено біля 400 мін різноманітних типів.

Важливість спроможності забезпечення стабільності роботи морських та річкових портів наглядно проілюстрували воєнні події 2022 року на території України. Заміновані військами російського агресора порти України в акваторії Чорного моря заблокували можливість поставок Україною врожаю зернових культур на світові ринки. Через те, що Україна була і залишається серед основних постачальників зерна на ринки африканських країн, тривале блокування українських морських портів привело до стрімкого нарощування вартості зерна на світових ринках. Більше того, цілком реально постає небезпека голоду в економічно відсталіх африканських країнах, для яких саме Україна є основним постачальником. Закономірно, що це провокуватиме соціальні заворушення через небезпеку можливого голодування населення.

Ця ситуація зайвий раз підкреслює вагомість забезпечення стабільності роботи морських портів, а відповідно, і пов'язаної з цим проблеми швидкого та гарантованого ефективного розмінування морських корабельних рейдів та акваторій портів.

Тому актуальною залишається проблема вдосконалення методів пошуку та знешкодження морських мін усіх типів та різновидів, у тому числі і плавучих мін.

Огляд попередніх досліджень

Не зважаючи на появу доволі оригінальних методів та обладнання для пошуку та розмінування мін все ще найбільш вживаною залишається методика розмінування мінних полів самохідними тралами. Переважно це спеціально обладнані катери на зразок шведського SAM-3 чи американського SAM-05, котрі адаптовані до сприйняття і протистояння вибухам мін [1]. Доволі часто теперішні катери-тралівники оснащують різноманітними імітаторами вібрацій, шумів та збурювачами магнітних полів для імітації ними рухомих на рейді кораблів та провокацій мінних давачів на вибух. Теперішні катери-тралівники це переважно розбірні понтонні катери з швидкістю руху 6–8 вузлів, які легко перетранспортовуються літаками на необхідні ділянки та участки моря.

Певною альтернативою самохідних тралів можуть вважатися так звані вертолїтні трали [2]. Ці трали теж облаштовують генераторами магнітних полів та підрізним устаткуванням для знешкодження якірних мін. Типовий представник таких тралів – це трал на підводних крилах Harris МК-105.

Якщо йдеться про потребу у розмінуванні значних площ морської акваторії то перевагу, звичайно, віддають великотонажним спеціалізованим кораблям-тралівникам. По суті це велика універсальна платформа для базування, транспортування надводних, повітряних та безпілотних механізмів для виявлення усіх без винятку типів мін і їх знешкодження. Водовитіснення такого корабля-тралівника сягає до 3500 тонн, швидкість 15-20 вузлів. В процесі розмінування такий корабель розвідує та очищає 10-20 квадратних кілометрів за годину і до 500 км² щодоби [1].

Інколи для імітації шумів та полів корабля застосовують систему із з'єднаних між собою понтонів, на яких встановлені генератори магнітного, акустичного та електромагнітного полів. Літальний апарат, наприклад гелікоптер чи потужний дрон транспортують ці понтони на поверхні моря, імітуючи корабель

та провокуючи вибух міни [1]. Такі понтонні системи виготовляє виробник Thales Australia.

Для пошуку плавучих мін у наближених до берега ділянок морів доволі часто застосовують і гелікоптери чи повітряні безпілотники із лазерними системами сканування приповерхневих вод [1]. Прикладом використання такої схеми пошуку мін є застосування ВМС США база для лазерного сканування моделі Northrop Grumman MQ-8 Fire Scout.

Відносно новим кроком у дослідженні методик пошуку плавучих мін є застосування до пошукових робіт безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Загалом для розвідувально-пошукових робіт БПЛА власне кажучи і були створені. Однак для пошуку морських мін автори пропонують їх застосування вперше.

Свою ефективність як диверсійно-розвідувальне озброєння БПЛА особливо переконливо продемонстрували на полях воєнних дій російсько-української війни у 2022 році. Практично безшумні та невидимі для ворожих радарів ці літальні апарати стали незамінними для збору корисної розвідувальної інформації про дислокацію техніки та особового складу противника [3]. Оснащені сучасною відеоапаратурою із великою роздільною здатністю ці літаючі розвідники стали невід'ємною складовою практично кожного навіть незначного за чисельністю військового підрозділу [4].

А оснащення так званих «повітряних безпілотників» більш потужними двигунами та пристроями для транспортування, утримування та дистанційно керуваного скидання вибухових боєзарядів взагалі перетворило їх на грізну сучасну зброю [5]. Власне кажучи, саме спроможність не лише виявляти малогабаритні предмети на земній та водній поверхні, а і бомбардувати і дистанційно підірвати їх боєзарядами і стало першопричиною нашої рекомендації щодо застосування БПЛА до пошуку та знешкодження плавучих мін.

Слід відзначити, що автори статті мають певний позитивний досвід у застосуванні БПЛА для пошуку рухомих об'єктів засобами кінематичного проектування. Зокрема, у наших наукових дослідженнях описані схеми використання БПЛА у сільському та лісовому господарствах [6; 7], в кінематографії [8] та аерофотогеодезії [9], у військовій справі для виявлення координат ворожих диверсійно-розвідувальних безпілотних літальних апаратів [10; 11; 12]. Переважна більшість цих досліджень базується на органічному поєднанні розвідувальних можливостей сучасної малогабаритної відеоапаратури, якою оснащені літаючі безпілотники та дрони, із спроможністю високоточних розрахунків координат просторових переміщень об'єктів обчислювальною технікою на підставі даних кінематичного проектування.

Опирались ці дослідження на досвід працівників Національного університету «Львівська політехніка» (Україна) в галузі аерофотогеодезії у застосуванні БПЛА для визначення координат місцевості при складанні топографічних карт [13; 14].

Стосовно використовуваного нами методу кінематичного проектування відзначимо, що цей метод проектування дозволяє визначати миттєві координати та траєкторії просторових переміщень рухомих об'єктів. При цьому при наявності руху всіх без винятку засобів і складових проектування, а саме об'єктів проектування, «спостерігачів» та координатної площини із проектуючими променями.

При цьому усі ці об'єкти проектування або частина з них можуть знаходитися у прискореному або рівномірному русі, а рух кожного із складових проектування не залежний від руху інших його складових [8; 10; 15].

Практичне застосування теоретичних основ кінематичного проектування відкриває нові можливості у відображенні рухомих об'єктів простору, в питаннях пошуку миттєвих координат їх розташування, а за потреби – і у визначенні характеристик та складових руху [10; 11; 15].

Основною метою даного дослідження була розробка методу пошуку плавучих мін для розмінування морських та річкових водних акваторій.

Для вирішення даної мети було сформульовано наступні завдання:

- розробити методику визначення просторових координат розташованого на водній поверхні твердого тіла засобами кінематичного проектування;
- визначити оптимальну кількість безпілотних літальних апаратів для визначення координат плавучої міни;
- дослідження і розробка оптимальної траєкторії просторових переміщень БПЛА при пошуку ними плавучих мін;
- створення алгоритму програмного забезпечення для розробки програми узгодження даних БПЛА при визначенні ними місця розташування плавучої міни.

Виклад основного матеріалу

Проведений аналіз застосування різноманітних засобів для пошуку та знешкодження плавучих мін переконливо підводить до думки та переконання, що найоптимальнішим буде органічне поєднання переваг застосування морських плавучих засобів та літаючої техніки [2; 5]. У випадку плавучих мін це повинно б бути поєднання одночасного застосування катерів-тралівників із безпілотними літальними апаратами (БПЛА). На катері-тралівнику, наприклад, моделі ARCIS Atlas Electronik, повинні бути облаштовані командний пункт із засобами керування пошуковими переміщеннями літальних апаратів та програмним забезпеченням розрахунків координат виявлених мін, радіолокаційна станція (РЛС) для відслідковування БПЛА, площадка для запуску та посадки літальних апаратів і звичайно спорядження для дистанційного знешкодження виявлених мін [1; 3; 16].

У якості пошукових літальних апаратів доречно скористатися дронами чи квадрокоптерами середніх типорозмірів, що спроможні транспортувати на собі переносне радіолокаційне обладнання масою до 40кг із ефективним радіусом дії 200–250 м та обладнанням візуалізації і спостереження за поверхнею моря із високою роздільною здатністю та радіусом дії не менше 100 м [9; 13]. На випадок потреби підриву виявлених мін ці літальні апарати повинні бути оснащені дистанційно керованими тримачами боєвих зарядів. Таким вимогам відповідають доволі багато різновидів безпілотників, наприклад, моделей “Predator-B” (фірма “General Atomic Aeronautical Systems Inc”, США), “Grand Duck” (“Dasso”, Франція) тощо. Та найефективнішим, на нашу думку, було б використання для ліквідації виявлених мін малогабаритного дрона-ліквідатора моделі Switchblade 600. Його перевагою, окрім незначних маси та розмірів, є наявність GPS-навігації і здатність пошуку та розпізнавання наперед заданих об'єктів. Вагомою є і здатність цього дрона-кемікадзе до 30 хвилин безперервного польоту із крейсерською швидкістю 112 км/год.

Якщо пошук плаваючих мін здійснюють у прибереговій акваторії моря, віддаленій від берега на декілька кілометрів, то командний пункт керування пошуковою роботою дронів облаштовують, переважно на березі. Якщо ж пошукові маневри здійснюють у відкритому морі на ділянках, що віддалені від берегової смуги на десятки кілометрів, то для базування, запуску, керівництва роботою та траєкторіями рухів дронів доцільно використовувати належним чином облаштований катер-тралівник. Враховуючи, що плавучі міни під дією вітрів, збурення морської поверхні, течій та водоворотів можуть переміщатися по поверхні моря, виявлені дронами координатами місця розташування цих мін не є сталими і можуть постійно змінюватися. Тому виявлені дронами плавучі міни доцільно постійно відстежувати, а ще краще, забезпечивши безпеку для морських плавзасобів та людей, знищувати. Для цього можуть бути використаними ті ж таки пошукові дрони, що замість пошукової апаратури оснащені підвісними боєзарядами [4; 10].

Звичайно для пошуків плавучих мін із застосуванням безпілотних літальних апаратів необхідні, окрім належних погодних умов, зокрема, сили вітру, і певні розрахункові траєкторії їх просторових переміщень. Більше того виявлені у попередні пошукові дні плавучі міни під дією вітрів і течій неодмінно змінять своє місце розташування і їх доведеться розшукувати заново. Тому, організовуючи пошукові роботи із розмінування певних акваторій моря доречно таким чином організувати пошукові роботи, щоб максимально широко охопити площі пошукових ділянок, а також забезпечити знешкодження виявлених боєзарядів. Тому тут важливе значення мають, поряд із потужністю пошукової апаратури, і траєкторії пошукових переміщень використовуваних для пошуків технічних засобів. Часто при цьому збільшують кількість одночасно використовуваних технічних пошукових засобів, узгоджуючи поміж ними режими пошукової роботи та траєкторій їх просторових переміщень.

Певним чином пошуки «плавучих» мін значною мірою схожі на переміщення риболовецьких суден при пошуках ними косяків риби, придатних для морського промислу.

Розмінування морської акваторії від плавучих мін із використанням безпілотних апаратів здійснюють у наступній послідовності. Катер-тралівник 1 із завантаженими на нього чотирма БПЛА 2 типу «дрон», що оснащені вище відзначеним пошуковим обладнанням, а також вибуховими зарядами для підриву виявлених мін, заходить в центральну частину виділеної йому для пошуків мін ділянки акваторій моря. Тут він стає на якір, якщо це дозволяє глибина моря, або повільно дрейфує, час від часу відкореговуючи своє місце розташування поблизу центру пошукової ділянки. В небо почергово запускають три дрони 2 із радіолокаційною пошуковою апаратурою та спостережувальними відеокамерами. Командний пункт керування пошуковими роботами за допомогою відповідних комп'ютерних програм керування пошуковими переміщеннями на першому етапі вилаштовує трійку дронів в одну лінію на віддалі, наприклад «а» один від одного та від командного пункту на катері-тралівнику 1. Віддаль «а» між дронами призначають рівною діаметру d півсфери ефективної дії їх пошукової радіолокаційної апаратури, тобто $a = d = 2r$, де r – радіус ефективного пошуку дрона (рис. 1).

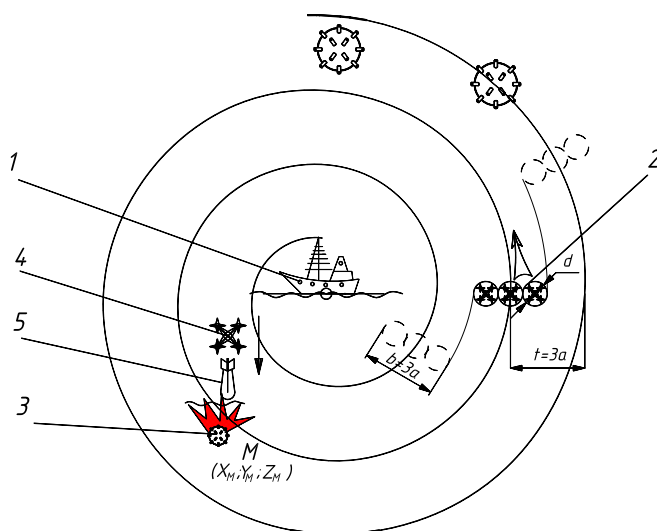


Рис. 1. Траєкторія просторових переміщень пошукових дронів по спіралі Архімеда

Вилаштуванім у одну лінію пошуковим дронам 2 подають команду на просторові переміщення цієї трійки дронів по спіралі Архімеда, крок якої рівний

$$b = 3a = 3d = 6r;$$

де $b = 3a$ – ширина ділянки одночасного охоплення дронами пошукової зони, d та r – відповідно діаметр та радіус півсфери дії пошукової радіолокаційної апаратури.

Центр спіралі Архімеда, по якій переміщуються в повітрі пошукові дрони 2, умовно облаштований на катері-тралівнику 1, а висота польоту не перевищує радіуса r ефективної дії пошукової апаратури. При вище вказаних параметрах пошукової апаратури як оптимальні можна було б рекомендувати наступні параметри траєкторії лету пошукових дронів:

- висота лету – 50 м;
- віддаль між дронами – a – 100 м;
- $t = 6r = 6 \cdot 50 = 300$ м – крок спіралі Архімеда просторового переміщення дронів;
- $r = 50$ м – радіус півсфери ефективного пошуку радіолокаційної апаратури;
- $b = 3a = 3 \cdot 100 = 300$ м – ширина смуги ділянки пошуку, охопленої трьома дронами.

Траєкторія руху пошукових дронів по спіралі Архімеда обрано із двох міркувань:

- дана траєкторія не допускає наявності необстежених ділянок акваторії моря;
- ця плавна траєкторія, на відміну від інших можливих, не передбачає зворотних рухів та стрімких поворотів, що не є бажаним для літальних апаратів.

Якщо прийняти за середню допустиму швидкість лету пошукових дронів швидкість $v = 5 - 5,5$ м/с = 18 – 20 км/год., то за годину часу цими трьома пошуковими дронами при просторових їх переміщеннях по спіралі Архімеда буде обстежено приблизно шість квадратних кілометрів акваторії моря.

У випадку виявлення будь-яким із пошукових дронів плаваючої міни 3 облітними територією по спіралі Архімеда призупиняють. По відповідній команді із командного пункту катера-тралівника 1 дрони 2 «зависають» над виявленою міною, розташувались над нею рівностороннім трикутником, геометричний центр якого співпадає із точкою розміщення міни [6; 14].

Після цього вмикають одночасно на трьох дронах 2 спостережну ідентифікаційну апаратуру для ідентифікації виявленого дронами на морській поверхні предмету. Саме спостереження та фотографії плаваючого предмету з трьох зміщених на 120° одна від одної точок (дронів) надають можливість побудови на екрані монітора комп'ютера командного пункту твердотільної моделі даного досліджуваного об'єкта. Тому в даній схемі пошуку мін і використовують одночасно саме три пошукових дрони.

Якщо виявлений на поверхні моря плаваючий предмет все ж таки виявиться плаваючою міною 3, приступають до її знешкодження. Для цього використовують дрон-ліквідатор 4 із дистанційно керованим боєзарядом 5 (рис. 1).

Для цього, перш за все, використовуючи відповідну програму, уточнюють координати розташування даної міни 3. Дана програма передбачає запровадження уявної системи ортогональних просторових Декартових координат із розташуванням початку відліку координат на місці катера-тралівника 1 (рис. 2). Нумерація позицій на цьому та наступних рисунках співпадає із номерами позицій на рис. 1.

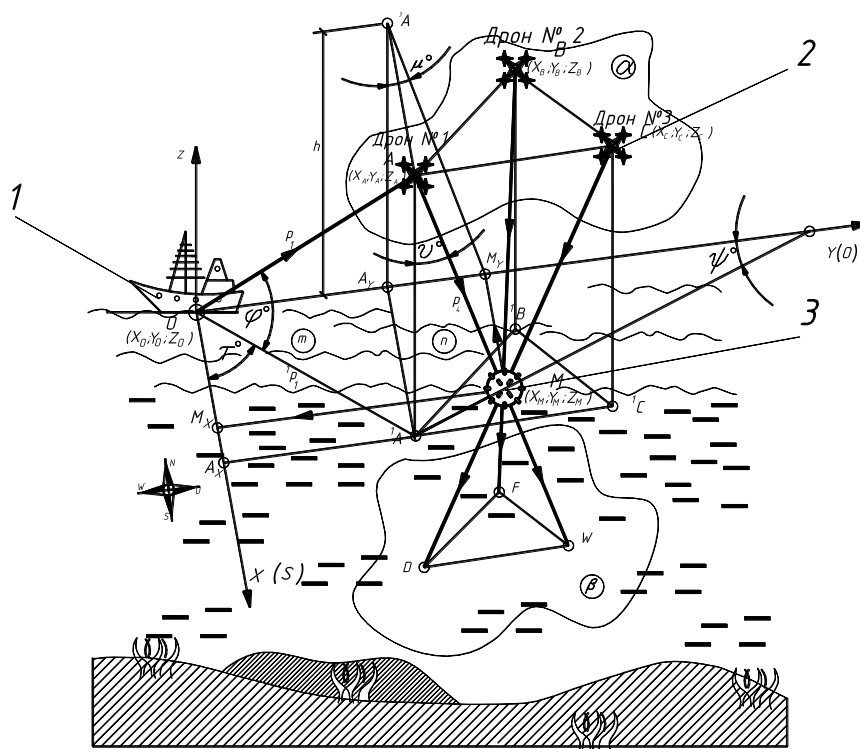


Рис. 2 Схема розрахунку координат виявленої пошуковими дронами плаваючої міни

Вісь x уявно спрямовують в напрямку однієї із геодезичних сторін світу досліджуваної ділянки пошуку мін, наприклад, на південь. Перпендикулярну їй вісь y – в напрямку іншої сторони світу, наприклад, на схід. Вісь z спрямовують вгору перпендикулярно двом іншим осям. Утворена двома взаємно перпендикулярними осями x та y горизонтальна площина проєкцій цієї системи координат співпадає із поверхнею моря. Напрямки осей призначають таким чином, щоб виявлена міна 3 та пошукові дрони 2 розташувались в межах першого октанту окресленого площинами проєкцій простору (рис. 2) [10].

Встановленою на катері-тралівнику 1 радіолокаційною станцією (РЛС) визначають координати кожного із розміщених над міною дронів 2 у запровадженій системі. До цих координат належить віддаль l від РЛС до кожного із трьох пошукових дронів, що на даний період часу розміщені над виявленою міною 3, а також кути нахилу уявних проєктуючих променів, що проходять від РЛС до кожного із дронів. На рис. 2 ці побудови позначено наступним чином:

- пошукові дрони № 1-А, № 2-В та № 3-С, а їх проєкції на площину поверхні моря відповідно 1A , 1B , 1C ;
- віддаль від РЛС до пошукових дронів $l_1 = OA$; $l_2 = OB$; $l_3 = OC$.;
- проєктуючі промені, що проходять від РЛС через пошукові дрони – p_1, p_2, p_3 . Їх проєкції на площину поверхні моря відповідно ${}^1p_1, {}^1p_2, {}^1p_3$;
- кути між проєктуючими променями та їх проєкціями на площину поверхні моря відповідно:

$$\varphi^\circ = p_1 \wedge {}^1p_1 = OA \wedge O^1A \text{ (рис. 2);}$$

$$\gamma^\circ = p_2 \wedge {}^1p_2 = OB \wedge O^1B \text{ (рис. 3);}$$

$$\delta^\circ = p_3 \wedge {}^1p_3 = OC \wedge O^1C \text{ (рис. 4).}$$

Подальші розрахунки координат розташування виявленої міни здійснюють використовуючи відповідне програмне забезпечення за наступним алгоритмом [6; 10].

Спершу із відповідних трикутників ΔAO^1A , ΔBO^1B , та ΔCO^1C визначають висоту розташування дронів 2 над поверхнею моря $h = l_1 \sin \varphi$, та вирівнюють її для всіх трьох дронів. Позначають утворену трьома дронами площину як базову площину $\alpha(A, B, C)$. Ця базова площина α паралельна поверхні моря і віддалена від нього на висоту $h = \left| \alpha \wedge {}^1\Pi \right|$.

У подальшому програмою розрахунку передбачено, що із переносних радіолокаційних станцій кожного із дронів 2 уявно проведено проєктуючі промені, що проходять безпосередньо через сам дрон та виявлену міну 3, тобто $p_4 = AM$, $p_5 = BM$, та $p_6 = CM$. Фіксують кути нахилу цих проєктуючих променів до відповідних перпендикулярів з точок A , B та C на поверхню площини моря, тобто

$$\nu^\circ = p_4 \wedge A^1A = AM \wedge A^1A;$$

$$\xi^\circ = p_5 \wedge B^1B = BM \wedge B^1B;$$

$$\epsilon^\circ = p_6 \wedge C^1C = CM \wedge C^1C.$$

Нижче поверхні моря на глибині $h_1 = \frac{h}{2}$ уявно облаштовують програмою розрахунків ще одну паралельну поверхні моря ${}^1\Pi(x, y)$ та базовій площині $\alpha(A, B, C)$ так звану «картинну» площину β . Продовжують уявні проєктуючі промені p_4 ,

p_5 та p_6 , що проходять від пошукових дронів 2 через виявлену міну M , до перетину із «картинною» площиною β і розраховують координати їх точок перетину, а саме

$$W(x_W, y_W, z_W) = p_4 \cap \beta / {}^1\Pi;$$

$$F(x_F, y_F, z_F) = p_5 \cap \beta / {}^1\Pi;$$

$$D(x_D, y_D, z_D) = p_6 \cap \beta / {}^1\Pi.$$

При цьому для просторової прив'язки проєктуючих променів до обраної системи координат додатково із визначених радарми дронів 2 азимутів проєктуючих променів визначають кут їх нахилу до будь-якої із вертикальних площин проєкцій обраної системи координат. Наприклад, профільної ${}^3\Pi(y, z)$, утвореної перетином осей y та z . Тоді

$$\mu^\circ = p_4 \wedge {}^3\Pi; \lambda^\circ = p_5 \wedge {}^3\Pi; \chi^\circ = p_6 \wedge {}^3\Pi$$

Дві утворені проєктуючими променями p_4, p_5 та p_6 та паралельними між собою основами піраміди $MABC$ та $MWFD$ подібні між собою. Їх площини основ

$\alpha(A, B, C)$ та $\beta(W, F, D)$ паралельні між собою. Ці піраміди мають спільну вершину в точці M , де розташована виявлена міна. Кути їх відповідних граней при вершині M рівні між собою, а бокові ребра одної є продовженням ребер іншої. Володіючи координатами точок A, B та C при основі верхньої піраміди $ABCM$, як даними вимірювання РЛС катера-тралівника 1, та координатами точок W, F та D при основі нижньої піраміди, як даними вимірювання радарів дронів 2, можна розрахувати шукані координати спільної вершини цих пірамід, тобто точки M як точки, у якій на даний момент розміщена виявлена плавуча міна 3.

Уявно спрямований із РЛС катера-тралівника на дрон № 1 (точка A на рис. 2) проєктуючий промінь p_1 та його проєкція 1p_1 на горизонтальну площину проєкцій ${}^1\Pi$, а також лінія зв'язку між точками A та 1A формують задану трикутником ΔAO^1A площину m (ΔAO^1A), яка перпендикулярна ${}^1\Pi$, тобто m (ΔAO^1A) \perp ${}^1\Pi(x, y)$. За азимутом РЛС по проєктуючому променю p_1 встановлюють кут його нахилу до ${}^1\Pi$, тобто $\phi^\circ = OA \wedge O^1A = p_1 \wedge {}^1p_1$ і уточнюють висоту розміщення дрона № 1 (точка A) над поверхнею моря

$$z_A = h = A^1A = OA \cdot \sin \phi = l_1 \cdot \sin \phi,$$

де $l_1 = OA$ – визначена РЛС віддаль від катера-тралівника до дрона № 1.

Довжина проєкцій 1p_1 проєктуючого променя p_1 на горизонтальній площині проєкцій становить

$${}^1p_1 = O^1A = OA \cdot \cos \phi = l_1 \cdot \cos \phi$$

Тоді координати точок A та 1A визначають із прямокутних трикутників Δ^1AOA_x та Δ^1AOA_y

$$x_A = OA_x = O^1A \cdot \cos \tau = l_1 \cdot \cos \phi \cdot \cos \tau = h \frac{\cos \tau}{\operatorname{tg} \phi};$$

$$y_A = A_x^1A = OA_y = {}^1p_1 \sin \tau = O^1A \cdot \sin \tau = l_1 \cdot \cos \phi \cdot \sin \tau = h \frac{\sin \tau}{\operatorname{tg} \phi}.$$

Тут τ° – кут між ${}^1p_1=O^1A$ та віссю x .

Таким чином визначено усі координати розташування дрона № 1 (точка А), дрона № 2 (точка В) та дрона № 3 (точка С) у запровадженій системі координат, а саме

$$\begin{aligned}x_A &= l_1 \cdot \cos \phi \cdot \cos \tau; x_B = l_2 \cdot \cos \gamma \cdot \cos k; x_C = l_3 \cdot \cos \delta \cdot \cos \eta; \\y_A &= l_1 \cdot \cos \phi \cdot \sin \tau; y_B = l_2 \cdot \cos \gamma \cdot \cos k; y_C = l_3 \cdot \cos \delta \cdot \cos \eta; \\z_A &= l_1 \cdot \sin \phi; z_B = l_2 \cdot \sin \gamma; z_C = l_3 \cdot \sin \delta;\end{aligned}\quad (1)$$

Тут k° – кут між проекцією проєктуючого променя 1p_5 та віссю x (рис. 3), а кут η – це кут між проекцією проєктуючого променя 1p_6 та віссю x (рис.4).

Із розташованого в точці А дрона № 1 його переносним радаром уявно спрямовують проєктуючий промінь p_4 на виявлену міну 3 в точці М, що лежить на поверхні моря. У нашому випадку в прийнятій системі координат точка М, тобто виявлена міна, розміщена на горизонтальній площині проєкцій ${}^1\Pi(x, y)$. Аналогічно попередньому випадку розглянуто проєктуючий промінь $p_4=AM$ (рис. 2). Його проєкція на ${}^1\Pi$, тобто ${}^1p_4 = M^1A \subset {}^1\Pi$, та лінія зв'язку A^1A формують прямокутний трикутник ΔAM^1A , площа якого $n(\Delta AM^1A)$ перпендикулярна площині проєкцій ${}^1\Pi$. До площини проєкцій ${}^3\Pi(y, z)$ площа цього трикутника нахилена під кутом ψ° . За допомогою азимута радара дрона № 1 визначають кут нахилу його уявного проєктуючого променя p_4 до лінії зв'язку A^1A , а саме $v^0 = p_4 \wedge A^1A$.

Із прямокутного трикутника ΔAM^1A визначають довжину відрізка AM

$$l_4 = AM = \frac{{}^1AA}{\sin v} = \frac{h}{\sin v}, \quad (2)$$

а із прямокутного трикутника 1AMK визначають різницю координат точок 1A та М, тобто

$$\Delta x_M = MK = {}^1AM \cdot \sin \psi = h \cdot \operatorname{tg} v \cdot \sin \psi; \quad (3)$$

$$\Delta y_M = {}^1AK = {}^1AM \cdot \cos \psi = h \cdot \operatorname{tg} v \cdot \cos \psi.$$

Таким чином координати виявленої міни (точка М) у прийнятій системі координат матимуть наступні розрахункові значення

$$\begin{aligned}x_M &= x_A \pm \Delta x_M = l_1 \cdot \cos \phi \cdot \cos \tau \pm h \cdot \operatorname{tg} v \cdot \sin \psi = h \left(\frac{\cos \tau}{\operatorname{tg} \phi} \pm \operatorname{tg} v \cdot \sin \psi \right); \\y_M &= y_A \pm \Delta y_M = l_1 \cdot \cos \phi \cdot \sin \tau \pm h \cdot \operatorname{tg} v \cdot \cos \psi = h \left(\frac{\sin \tau}{\operatorname{tg} \phi} \pm \operatorname{tg} v \cdot \cos \psi \right), \\z_M &= 0\end{aligned}\quad (4)$$

Знак «+» у вище приведених залежностях застосовують якщо кут ψ° гострий, і знак «-» якщо він тупий. Таким чином, використовуючи нескладну розрахункову програму, на підставі даних, поданих із встановленої на катері-тралівнику радіо-локаційної системи та даних переносних радарів на дронах, визначають координати виявленої дронами плавучої міни.

Для уточнення координат міни вище наведені розрахунки продублюють і для двох інших дронів. Вихідні дані для цих розрахунків та розрахункову схему наведено на рис. 3 та рис. 4.

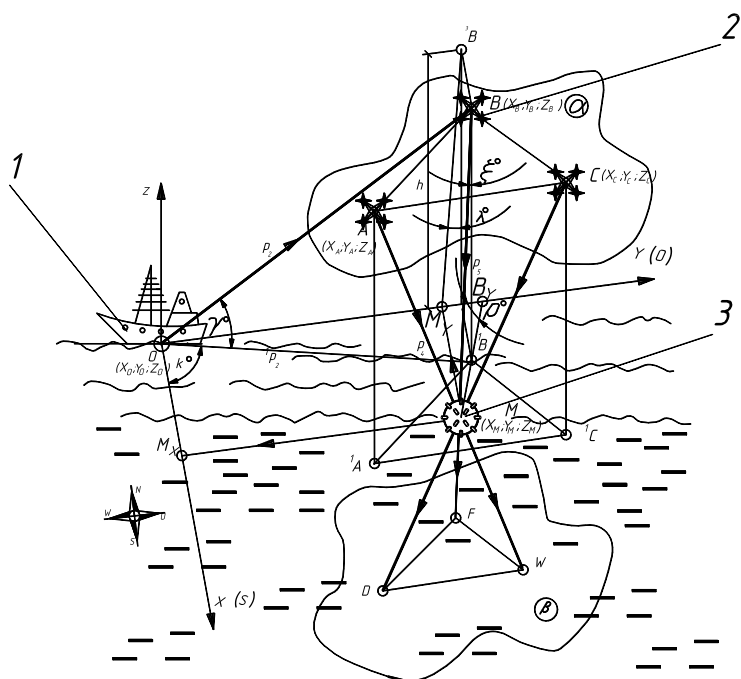


Рис. 3. Схема уточнення координат знайденої міни дронам № 2 (точка B)

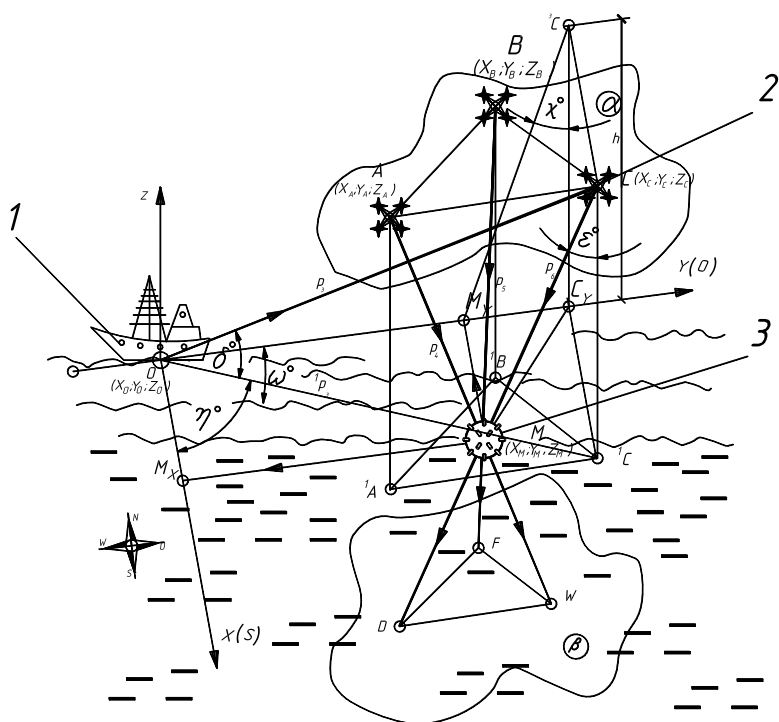


Рис. 4. Схема уточнення координат знайденої міни дронам № 3 (точка C)

Для перевірки правильності здійснених розрахунків за аналогічною схемою визначають координати точок W , F та D на проєктуючих променях p_4 , p_5 , p_6 , які розташовані на паралельній базовій «картинній» площині $\beta(W, F, D)$. Володіючи координатами точок на кінцях відрізка проєктуючого променя записують рівняння прямої лінії, що проходить через дві точки із відомими координатами. Тобто $A \in p_4$; $A(x_A, y_A, z_A)$; $W \in p_4$; $W(x_w, y_w, z_w)$; $p_4 \subset l_4$.

Тоді рівняння прямої l_4 матиме вигляд

$$\frac{x - x_A}{x_w - x_A} = \frac{y - y_A}{y_w - y_A} = \frac{z - z_A}{z_w - z_A}. \quad (5)$$

Аналогічно для проєктуючого променя p_5 , що проведений через дрон № 2 (точка B) та виявлену міну (точка M) і точку F з відомими координатами $F(x_F, y_F, z_F)$, рівняння прямої l_5 , що проведена через проєктуючий промінь p_5 , матиме вигляд

$$\frac{x - x_B}{x_F - x_B} = \frac{y - y_B}{y_F - y_B} = \frac{z - z_B}{z_F - z_B}. \quad (6)$$

Усі ці ж побудови та розрахунки здійснюють і для третього проєктуючого променя, що проходить через дрон № 3, міну M та точку D на «картинній» площині. Рівняння лінії l_6 , що проходить через ці точки, матиме вигляд.

$$\frac{x - x_C}{x_D - x_C} = \frac{y - y_C}{y_D - y_C} = \frac{z - z_C}{z_D - z_C}. \quad (7)$$

Формують системи рівнянь із будь-яких двох рівнянь проєктуючих променів і спільним їх рішенням шукають координати точок M , у якій розміщена виявлена міна. Якщо виявлені координати точки перетину між собою трьох проєктуючих променів співпадають у всіх вище відзначених кроках перевірок, то роблять висновок про відповідність розрахованих координат розміщення міни їх реальному значенню.

У подальшому для знешкодження виявленої міни команда катера-тралівника приймає рішення про вибір доступного для них методу безпосереднього знешкодження. Тут можливі декілька варіантів, у тому числі і підрив міни 3 із використанням БПЛА. У цьому випадку використовують четвертий із наявних на катері-тралівнику 1 дронів № 4. В автоматичному тримачі цього дрона 4 встановлюють відповідний боезаряд 5, вибухової речовини якого достатньо для підриву виявленої міни. Дрон-ліквідатор 4 із боезарядом 5, задавши йому розраховані координати виявленої міни, спрямовують на ліквідацію міни 3 (рис. 5).

Пошукові дрони № 1, № 2 та № 3 піднімаються на безпечну для них висоту, дрон-ліквідатор 4 розташовується над міною 3, відеокамерою він, по можливості, черговий раз уточнює тип міни та очікує команди на подальші дії. Командний пункт кінцево проаналізує безпеку вибуху міни 3 для довкілля, для людей та використовуваної пошукової техніки і дає команду на підривання міни. Пусковий механізм дрона-ліквідатора 4 розфіксує тримач боезаряду 5 і вибуховий заряд падає безпосередньо на міну чи поряд з нею у воду. Від ударного контакту боезаряду з міною 3 чи водою боезаряд 5 вибухає, провокуючи своїм вибухом і вибух виявленої міни завдяки її механічному ушкодженню чи детонації вибухової речовини.

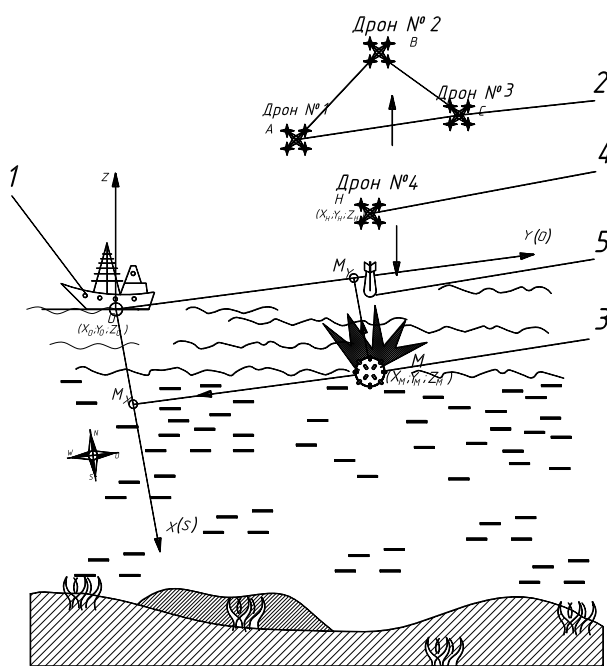


Рис. 5 Ліквідація виявленої плавучої міни

На рис. 6 відображена блок-схема послідовності розрахунків та побудови комп'ютерної програми для визначення координат виявленої БПЛА плавучої міни. Розрахункова блок-схема передбачає введення табличних вхідних даних, до яких належать модель та кількість пошукових дронів, характеристика їх просторового розташування та переміщень, висота лету під час пошуків плавучих мін.

Табличні вхідні дані блок-схеми розрахунку координат плавучих мін.

Таблиця 1

№ з/п	Назва заданого параметра	Позначення і числове значення заданого параметра
1.	Кількість пошукових БПЛА	Модель БПЛА – Кількість БПЛА – 3 штуки
2	Траєкторія пошукових переміщень БПЛА	Спіраль Архімеда Міжвиткова віддаль або крок спіралі $t = 3a = 3 \cdot 100 = 300$ м, $a = 100$ м – віддаль між дронами
3	Ширина смуги пошукової ділянки	$b = 3a = 3 \cdot 100 = 300$ м
4	Розташування БПЛА при виявленні міни	Трикутник ABC із довжиною кожної сторони $a = 100$ м та кутом 120° при вершинах
5	Висота розташування БПЛА над виявленою міною	$h = 25 - 50$ м

Безпосередньо розрахунок передбачає декілька етапів. Зокрема, визначення віддалі від базового катера-тралівника до кожного із розміщених над виявленою міною дронів, розрахунок координат проєкцій пошукових дронів на поверхню

моря, визначення довжини генерованих дронами проектуючих променів на виявлену міну тощо. На підставі цих даних розраховують координати міни і перевіряють їх точність. У випадку розбіжностей прорахованих по кожному із пошукових дронів даних уточнюють кути нахилу та довжини проектуючих променів радіолокаційної станції катера-тралівника та аналогічні дані пошукових дронів (рис. 5).

Параметри проектуючих променів та їх проекцій в обраній системі координат (рис. 2, рис. 3, рис. 4)

Таблиця 2

№ з/п	Проектуючі промені РЛС катера-тралівника (рис. 2, рис. 3, рис. 4)			
	Елементи просторового розташування проектуючих променів та їх проекцій	Дрон № 1	Дрон 2	Дрон № 3
1	Довжина l_i проектуючих променів	$p_1 = l_1 = OA$	$p_2 = l_2 = OB$	$p_3 = l_3 = OC$
2	Довжина проекцій p_i проектуючих променів	${}^1p_1 = O^1A$	${}^1p_2 = O^1B$	${}^1p_3 = O^1C$
3	Кути нахилу проектуючих променів та їх проекцій до поверхні моря (горизонтальної площини проекцій ${}^1\Pi$); Кути нахилу проекцій проектуючих променів p_i до осі x	$\varphi = p_1 \wedge {}^1p_1$ $\tau = {}^1p_1 = O^1A$	$\gamma = p_2 \wedge {}^1p_2$ $k = {}^1p_2 = O^1B$	$\delta = p_3 \wedge {}^1p_3$ $\eta = {}^1p_3 = O^1C$
	Проектуючі промені та їх проекції, генеровані пошуковими дронами (рис. 2, рис. 3, рис. 4)			
	Елементи просторового розташування проектуючих променів та їх проекцій	Дрон № 1	Дрон № 2	Дрон № 3
4	Довжина l_i проектуючих променів дронів	$p_4 = l_4 = AM$	$p_5 = l_5 = BM$	$p_6 = l_6 = MC$
5	Довжина проекцій p_i проектуючих променів дронів	${}^1p_4 = M^1A$	${}^1p_5 = M^1B$	${}^1p_6 = M^1C$
6	Кути нахилу проектуючих променів та їх проекцій до вертикальної лінії зв'язку	$\nu = p_4 \wedge A^1A$	$\xi = p_5 \wedge B^1B$	$\varepsilon = p_6 \wedge C^1C$
7	Кути нахилу площин, що проходять через проектуючі промені перпендикулярно поверхні моря, до площини проекцій ${}^3\Pi$	$\psi = n_4 \wedge {}^3\Pi$	$\rho = n_5 \wedge {}^3\Pi$	$\omega = n_6 \wedge {}^3\Pi$
8	Кути нахилу проектуючих променів до профільної площини проекцій ${}^3\Pi$	$\mu = p_4 \wedge {}^3\Pi$	$\lambda = p_5 \wedge {}^3\Pi$	$\chi = p_6 \wedge {}^3\Pi$

Таким чином при використанні даного методу пошуку та ліквідації мін практично немає потреби у безпосередньому контакті людей командного пункту катера-тралівника із небезпечною для їх життя міною. Хоч, звичайно, ситуації на розмінуванні можуть складатися по-різному. Наприклад, потужності скинутого з дрона-ліквідатора боезаряду може виявитись недостатньо для підриву міни. Тоді катерові-тралівнику доведеться протралити зону моря, де розміщена міна і знешкодити її. Або ж використати інші більш потужні сучасні засоби ліквідації мін.

Наприклад, плавучі безпілотні апарати, оснащені керованими торпедами-ліквідаторами чи, так звані роботи-камікадзе. Їх самопідрив на виявленій міні руйнує її оболонку і міна або вибухає, або руйнується, перестаючи бути загрозою для людей та плавзасобів.

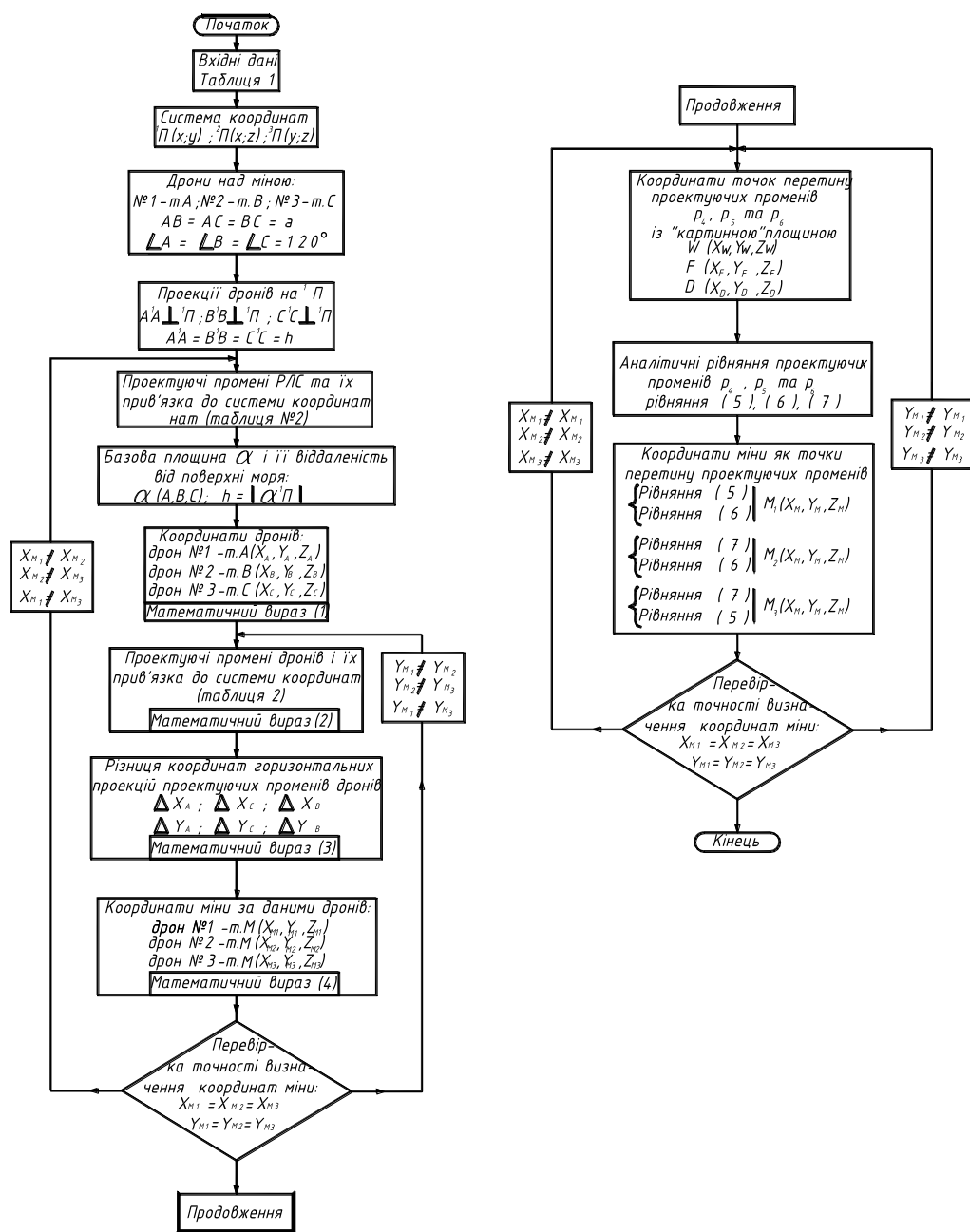


Рис. 6. Блок-схема розрахунків координат виявлених плавучих мін

Обговорення результатів дослідження

Звичайно, як і більшість інженерних рішень, даний метод розмінування акваторії поверхні моря та річок має як свої переваги, так і свої вагомні недоліки. Незаперечно найвагомішим із недоліків є те, що він придатний лише для плавучих мін, що дрейфують на поверхні водойми. Ні для розмінування так званих якірних мін, ні для знешкодження донних мін він, звичайно, не придатний. Непридатний тому, що переносні радары, якими споряджені пошукові дрони, не спроможні ефективно відсканувати товщу води, у якій ці міни знаходяться.

Іншим відчутним недоліком описаного методу розмінування є його критична залежність від погодних умов. Вітер із швидкістю понад 7-8 м/с, збурення хвиль висотою понад 1,5 метри, надмірна задимленість повітря, інтенсивні дощові чи снігові опади – усе це унеможлиблює використання дронів як літальних апаратів, а відповідно і унеможлиблює застосування засобів кінематичного проектування для пошуку мін на поверхні моря.

Певним недоліком є і те, що виявлені даним методом міни не можливо позбавити плавучості чи зафіксувати на місці їх виявлення. Тому ці виявлені плавучі міни необхідно відразу ж по виявленню ліквідувати. Інакше вони можуть бути віднесені вітрами чи течіями в інші ділянки і їх пошуки доведеться розпочинати заново.

Та є дві незаперечні переваги, які властиві методиці застосування кінематичного проектування для пошуку плавучих мін. Перш за все, це повне усунення людей як від пошукових переміщень, так і від знешкодження мін. Це дуже важливо, бо процес розмінування не тільки довготривалий, а і вкрай небезпечний для команди катерів-тральників та водолазів.

Іншою вагомою перевагою даного методу розмінування є відносно висока продуктивність та швидкість його пошукових робіт [14]. Широка смуга охоплення трьома летючими дронами пошукової території, їх узгоджені переміщення по спіралі Архімеда – усе це сприяє ефективним пошуковим роботам. До того ж це усуває наявність не обстежених ділянок, що доволі часто трапляється при зворотно-поступальних переміщеннях пошукових суден.

Ну і як позитивний аспект можна відзначити зведені до мінімуму пошукові переміщення катера-тральника. Він або стоїть на якорі або ж дрейфує із мінімальними витратами вартісного палива для роботи привідних двигунів. Незаперечно це компенсує витрати на придбання та оснащення пошуковою апаратурою дронів, на створення необхідного програмного забезпечення для керування пошуковими переміщеннями дронів. Адже для патрулювання аналогічної за площею в 6 км² ділянки моря катерові довелося б за годину проплисти біля 20 кілометрів, витративши на це приблизно 20 літрів палива вартістю приблизно 1000 гривень. А таких ділянок впродовж одного робочого дня буде не менше 5-6, тобто це щоденна економія 5-6 тисяч гривень.

На жаль, враховуючи воєнні події на території України, авторам статті не вдалося здійснити натурні випробування запропонованої схеми розмінування. Автори сподіваються здійснити це у майбутньому в мирний час і запрошують до співпраці усіх зацікавлених у результатах даного дослідження осіб та організацій.

Висновки

1. Стрімкий розвиток науки та техніки на межі тисячоліть суттєво вдосконалив військове озброєння загалом і засоби мінування як на суші, так і на водних просторах, зокрема. Новітні можливості та технології виготовлення вибухових речовин, застосовувані для виготовлення мін сучасні матеріали, високоякісна електроніка керування моментом вибуху та інші досягнення перетворили сучасні міни із «пасивного очікувача» в потужних гіперактивних автономних руйнівників водних плавучих засобів.

2. Серед різновидів мінного озброєння, яке використовують на акваторіях річок та морів, плавучі міни найменш потужні. Проте вони найпідступніші через відсутність керованості їх переміщень вітрами, течіями та морськими хвилями. Тому, поряд із небезпекою для військових плавучих засобів, ці міни ще більш небезпечні для цивільного населення, що проживає, працює чи відпочиває на берегах водойм. Адже припливши до берега чи потрапивши на міліну чи берегове каміння ця міна несподівано вибухає навіть від ударних контактів із ґрунтом чи камінням дна водойми.

3. Суть запропонованого методу полягає у застосуванні для пошуку плавучих мін групи безпілотних літальних апаратів типу «дрон», результати пошуків яких зводяться до розрахунків координат виявленої плавучої міни засобами кінематичного проектування. Використання малогабаритних економних пошукових літальних апаратів усуває потребу в пошукових переміщеннях катерів-тральників. Це відчутно здешевлює пошукові роботи, підвищує їх безпеку для командного складу катерів-тральників.

4. Серед когорти можливих траєкторій переміщень літальних апаратів та катера-тральника при пошуках плавучих мін рекомендовано як оптимальну траєкторію польотів пошукових апаратів групою із трьох вилаштуваних в ряд дронів по спіралі Архімеда із міжвитковим кроком, пропорційним кількості пошукових дронів та радіусу ефективної дії їх пошукової апаратури.

5. Не зважаючи на недоліки методу пошуку плавучих мін БПЛА із застосуванням засобів кінематичного проектування, що полягають у його підвищеній чутливості до метеорологічних погодніх умов, а особливо, до вітрового навантаження на пошукові дрони, все ж даний метод має перспективу широкого практичного застосування. Пояснюється це тим, що перш за все, при його використанні усувається небезпека контакту людей із вибухонебезпечною міною, а по-друге, застосування даного методу усуває потребу в пошукових переходах катера-тральника, забезпечуючи тим самим відчутну економію палива.

ЛІТЕРАТУРА

1. Антонов Р. БПЛА допоможуть виявити нездетонувавші боєприпаси // Мілітарний : портал. URL: <https://mil.in.ua/uk/news/bpla-dopomozhuvyavlyaty-nezdetonuvavshi-boeyegrupy/> (дата звернення: 18.08.2022).
2. Вертолiтний трал на підводних крилах Harris MK-105 // Think Defence. URL: www.thinkdefence.co.uk (дата звернення: 18.08.2022).
3. Лаврівський М. З., Тур Н. Є. Використання безпілотних літальних апаратів в моніторингу надзвичайних ситуацій у лісовій місцевості. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2015. Вип. 258. С. 353–359.

4. Кучеренко Ю. Ф., Науменко М. В., Кузнецова М. Ю. Аналіз досвіду застосування безпілотних літальних апаратів та визначення напрямку їх подальшого розвитку при веденні мережецентричних операцій. *Системи озброєння і військова техніка*. 2018. № 1. С. 25–30. DOI: 10.30748/soivt.2018.53.03
5. Мосов С. Беспилотная разведывательная авиация стран мира: история создания, опыт боевого применения, современное состояние, перспективы развития : монография. Киев : РУМБ, 2008. 160 с.
6. Кінематичне проєціювання як засіб управління технікою в автоматизованих землеробних комплексах / І. Г. Свідрак, Л. І. Шевчук, О. І. Строган, Л. Р. Струтинська, І. В. Строган. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2021. № 5. Т. 31. С. 102–107.
7. Афтаназів І. С., Строган О. І., Струтинська Л. Р., Строган І. В. Застосування кінематичного проєціювання в автоматизованих землеробних комплексах. *Problems of science and practice, tasks and ways to solve them : abstracts of XI International scientific and practical conference, Warsaw, Poland, March 22–25, 2022*. Warsaw, 2022. Р. 351–355.
8. Визначення просторових координат точок панорамного знімання / І. Г. Свідрак, О. Р. Баранецька, В. І. Топчій, А. О. Шевчук, Н. С. Галкіна. *Збірник наукових праць МДПУ ім. Б. Хмельницького*. Мелітополь, 2014. Вип. 2. С. 136–140.
9. Шульц Р. В., Войтенко С. П., Крельштейн П. Д., Маліна І. А. До питання розрахунку точності визначення координат точок під час аерофотознімання з безпілотних літальних апаратів. *Інженерна геодезія*. 2015. Вип. 62. С. 124–136.
10. Svidrak I. G., Aftanaziv I. S., Shevchuk L. I., Strogan O. I. Determination of coordinates of unmanned aircrafts by means of kinematic projection. *Mathematical Modeling and Computing*. 2022. Vol. 9, № 2. Р. 459–469. DOI: <https://doi.org/10.23939/mmc2022.02.459>
11. Свідрак І. Г., Афтаназів І. С., Строган О. І., Шевчук А. О. Кінематичне проєціювання в сучасних технологіях. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького. Серія «Харчові технології»*. 2021. Т. 23, № 96. С. 67–75. DOI: <https://doi.org/10.32718/nvlvet-f9612>
12. Афтаназів І. С., Свідрак І. Г., Строган О. І. Визначення координат безпілотних літальних апаратів. *Сучасні дослідження у світовій науці : матеріали II-ї Міжнародної науково-практичної конференції (Львів, 15–17 травня, 2022 р.)*. Львів, 2022. С. 380–388.
13. Янчук Р. М., Трохимець С. М. Створення картографічної основи для розробки генеральних планів населених пунктів за матеріалами аерознімання з непрофесійних БПЛА. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Технічні науки*. 2017. Вип. 1. С. 32–39.
14. Глотов В., Фис М., Пащетник О. Розробка методики підвищення точності визначення просторових координат точок об'єктів при аерозніманні з БПЛА *Геодезія, картографія і аерофотознімання*.

Львів, 2020. Вип. 92. С. 45–54. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcgsap.2020.92.045>

15. Калиновская О. П., Глоговский В. В., Пулькевич И. Г. К проблеме единой теории проекционных отображений. *Прикладная геометрия и инженерная графика*. 1994. Вып. 57. С. 45–50.
16. Апальков Ю. В. ВМФ СССР и России. Корабли противоминной обороны. Часть 2. СПб : Морское наследие, 2019. 224 с.

REFERENCES

1. Antonov, R. (2022) UAVs will help detect unexploded ordnance [BPLA dopomozhut vyivaty nezdetonuvavshi boieprypasy]. *Military portal*. Retrieved from <https://mil.in.ua/uk/news/bpla-dopomozhut-vyivaty-nezdetonuvavshi-boieprypasy/> [in Ukrainian].
2. Harris MK-105 hydrofoil trawler [Vertolnitnyi tral na pidvodnykh krylakh Harris MK-105]. (2022). *Think Defence*. Retrieved from www.thinkdefence.co.uk. [in Ukrainian].
3. Lavrivskiy, M.Z. & Tur, N.Ye. (2015). The use of unmanned aerial vehicles in monitoring emergency situations in forest areas [Vykorystannia bezpilotnykh litalnykh aparativ v monitorynhu nadzvychainykh sytuatsii u lisovii mistsevosti]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, 258, 353–359. [in Ukrainian].
4. Kucherenko, Yu.F., Naumenko, M.V. & Kuznietsova M.Iu. (2018). Analysis of the experience of using unmanned aerial vehicles and determining the direction of their further development in conducting network-centric operations [Analiz dosvidu zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ ta vyznachennia napriamku yikh podalshoho rozvytku pry provedenni merezhetsentrychnykh operatsii]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*, 1, 25–30. DOI: 10.30748/soivt.2018.53.03 [in Ukrainian].
5. Mosov, S. (2008). Unmanned reconnaissance aircraft of the countries of the world: history of creation, experience of combat use, current state, development prospects [Bespylotnaia razvedyvatelnaia avyatsiia stran myra: ystoriya sozdaniya, opyt boevoho pryumeneniya, sovremennoe sostoianye, perspektivy razvytiya]. Kyev : RUMB [in Russian].
6. Svidrak, I.H., Shevchuk, L.I., Strohan, O.I., Strutynska, L.R. & Strohan, I.V. (2021). Kinematic projection as a means of controlling equipment in automated agricultural complexes [Kinematychno proetsiuvannia yak zasib upravlinnia tekhnikoju v avtomatyzovanykh zemlerobnykh kompleksakh]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, 31(5), 102–107. [in Ukrainian].
7. Aftanaziv, I.S., Strohan, O.I., Strutynska, L.R. & Strohan, I.V. (2022). Application of kinematic projection in automated agricultural complexes [Zastosuvannia kinematychnoho proetsiuvannia v avtomatyzovanykh zemlerobnykh kompleksakh]. *Problems of science and practice, tasks and ways to solve them*, abstracts of XI International scientific and practical conference, Warsaw, Poland, March 22–25, 2022. Warsaw [in Ukrainian].
8. Svidrak, I.H., Baranetska, O.R., Topchii, V.I., Shevchuk, A.O. & Halkina, N.S. (2014). Determination of spatial coordinates of points of panoramic

- shooting [Vyznachennia prostorovykh koordynat tochok panoramnoho znimannia]. *Zbirnyk naukovykh prats MDPU im. B. Khmelnytskoho*, 2, 136–140. [in Ukrainian].
9. Shults, R.V., Voitenko, S.P., Krelshstein, P.D. & Malina, I.A. (2015). To the question of calculating the accuracy of determining the coordinates of points during aerial photography from unmanned aerial vehicles [Do pytannia rozrakhunku tochnosti vyznachennia koordynat tochok pid chas aerofotoznimannia z bezpilotnykh litalnykh aparatyv]. *Inzhenerna heodeziia*, 62, 124–136. [in Ukrainian].
 10. Svidrak, I.G., Aftanaziv, I.S., Shevchuk, L.I. & Strohan, O.I. (2022). Determination of coordinates of unmanned aircrafts by means of kinematic projection. *Mathematical Modeling and Computing*, 9(2), 459–469. DOI: <https://doi.org/10.23939/mmc2022.02.459> [in English].
 11. Svidrak, I.H., Aftanaziv, I.S., Strohan, O.I. & Shevchuk, A.O. (2021). Kinematic projection in modern technologies [Kinematychni proetsiuvannia v suchasnykh tekhnolohiiakh]. *Naukovyi visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu veterynarnoi medytsyny ta biotekhnolohii imeni S. Z. Gzhytskoho. Seriya "Kharchovi tekhnolohii"*, 23(96), 67–75. DOI: <https://doi.org/10.32718/nvlvet-f9612> [in Ukrainian].
 12. Aftanaziv, I.S., Svidrak, I.H. & Strohan, O.I. (2022). Determining the coordinates of unmanned aerial vehicles [Vyznachennia koordynat bezpilotnykh litalnykh aparatyv]. *Suchasni doslidzhennia u svitovii nausti, materialy II Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (Lviv, 15–17 travnia, 2022). Lviv [in Ukrainian].
 13. Yanchuk, R.M. & Trokhymets, S.M. (2017). Creation of a cartographic basis for the development of general plans of settlements based on the materials of aerial photography from non-professional UAVs [Stvorennia kartohrafichnoi osnovy dlia rozrobky heneralnykh planiv naselenykh punktiv za materialamy aeroxnimannia z neprofesiinykh BPLA]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. Tekhnichni nauky*, 1, 32–39. [in Ukrainian].
 14. Hlotov, V., Fys, M. & Pashchetnyk, O. (2020). Development of a technique for increasing the accuracy of determining the spatial coordinates of object points during aerial photography from a UAV [Pashchetnyk Rozrobka metodyky pidvyshchennia tochnosti vyznachennia prostorovykh koordynat tochok obiektiv pry aeroxnimanni z BPLA]. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia*, 92, 45–54. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2020.92.045-54> [in Ukrainian].
 15. Kalynovskaia, O.P. Hlohovskyi, V.V. Pulkevych, I.H. (1994). On the problem of a unified theory of projection mappings [K probleme edynoi teoryy proektsyonnykh otobrazhenyi]. *Prykladnaja heometryja i inzhenernaja hrafiika*, 57, 45–50 [in Russian].
 16. Apalkov, Yu.V. (2019). *Navy of the USSR and Russia. Mine defense ships* [VMF SSSR i Rossii. Korabli protyvomynnoj oborony]. Chast 2. SPb : Morskoe nasledie [in Russian].

**INFLUENCE OF THE HUMAN FACTOR ON ENSURING
THE STABILITY AND RELIABILITY OF TRANSPORT AND LOGISTICS
SYSTEMS DURING THE RUSSIAN-UKRAINIAN WAR**

V.V. Klymenko¹, N.I. Novalska², G.M. Lozova³

¹PhD, Associate Professor of Organization of Aviation Works and Services Department,
National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-4168-3296

²PhD, Associate Professor of Organization of Aviation Works and Services Department,
National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-6331-9217

³PhD, Associate Professor of Department of Economic Theory, Macro- and Microeconomics,
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-0343-0463

Summary

Introduction. The development of society and scientific and technological progress strengthens the role of the human factor in ensuring the stability and reliability of transport and logistics systems. Moreover, the number of determinants that negatively affect the state of the human factor and the level of acceptable risk in the transport sector is currently growing in the martial law in Ukraine. **Purpose.** The purpose of the article is to identify the nature and components of the human factor and the peculiarities of its action in the transport and logistics system in peacetime and wartime. **Methods.** The following set of scientific methods was used in the study of human factor: analysis of scientific and technical literature and regulatory framework, dialectical method, structural analysis, systemic and synergetic approaches, general logical methods and scenario approach. **Results.** The article determines the human factor that can negatively affect the functioning of the transport and logistics system or increase the risk of adverse conditions. The components of the human factor were identified, and a set of practical tasks to be solved by the transport and logistics company for human factor management was analyzed. It has been proven that in peacetime the minimization of human impact on the transport and logistics system can be achieved through the creation and implementation of a safety management system, including anthropometric driver training, and process automation such as modern Transport Management System (TMS) to help the driver and monitor the environment in order to identify hazards in advance and prevent them. **Scientific novelty.** Risk factors associated with the action of the human factor on transport, which increase the occurrence of adverse events during the war in Ukraine, have been determined. **Practical significance.** Measures to establish a human factor risk management system for a transport and logistics company in wartime were proposed.

Key words: human factor; transport and logistics system, transport, human factor risk management system, transport management system.

**ВПЛИВ ЛЮДСЬКОГО ФАКТОРУ НА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ
ТА НАДІЙНОСТІ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ
ПІД ЧАС РОСІЙСЬКО-УКРАЇНСЬКОЇ ВІЙНИ**

В.В. Клименко¹, Н.І. Новальська², Г.М. Лозова³

¹к.е.н., доцент кафедри організації авіаційних робіт та послуг,
Національний авіаційний університет, Київ, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-4168-3296

²к.е.н., доцент кафедри організації авіаційних робіт та послуг,
Національний авіаційний університет, Київ, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-6331-9217

³к.е.н., доцент кафедри економічної теорії, макро- і мікроекономіки
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
ORCID ID: 0000-0003-0343-0463

Анотація

Вступ. Розвиток суспільства та науково-технічний прогрес посилюють роль людського фактора в забезпеченні стабільності та надійності транспортно-логістичних систем. Водночас, в умовах воєнного стану в Україні зростає кількість детермінант, які негативно впливають на стан людського фактора та рівень прийнятної ризику в транспортній сфері. **Мета.** Метою статті є виявлення сутності та складових людського фактора та особливостей його дії в транспортно-логістичній системі в мирний та воєнний час. **Методи.** При дослідженні людського фактора використовувався наступний комплекс наукових методів: аналіз науково-технічної літератури та нормативної бази, діалектичний метод, структурний аналіз, системний та синергетичний підходи, загальнологічні методи та сценарний підхід. **Результати.** У статті досліджено сутність людського фактора, який може негативно впливати на функціонування транспортно-логістичної системи або підвищувати ризику настання несприятливих подій. Також визначено складові людського фактора, проаналізовано комплекс практичних завдань, які має вирішувати транспортно-логістична компанія щодо управління людським фактором. Доведено, що у мирний час мінімізація впливу людського фактора на транспортно-логістичну систему може бути досягнута завдяки створенню та впровадженню системи управління безпекою, зокрема облаштування робочого місця водія із врахуванням вимог антропометрії, та автоматизації процесу, наприклад використання сучасних TMS для допомоги водію і моніторингу навколишнього середовища з метою завчасного виявлення небезпеки та її попередження. **Наукова новизна.** Визначено фактори ризику, пов'язані з дією людського фактора на транспорт, які збільшують виникнення несприятливих подій під час війни в Україні. **Практичне значення.** Запропоновано заходи щодо створення системи управління ризиками, пов'язаних із дією людського фактора, для транспортно-логістичної компанії в умовах воєнного часу.

Ключові слова: людський фактор, транспортно-логістична система, транспорт, система управління ризиками людського фактора, система управління транспортом.

Introduction. The development of society and scientific and technological progress strengthens the role of the human factor in ensuring the stability and reliability of transport and logistics systems. With the transition to a post-industrial society, the complexity and automation of the transport and logistics system, increased traffic in the 70s of the twentieth century, the role of the human factor began to grow significantly in the man-made sphere and accounted for 80 % of rail transport events. So far, 3/4 of all man-made emergencies have been due to technical reasons. Somewhat different statistics in the aviation industry: if in the twentieth century 50 % of accidents were due to the human factor, and the rest of the reasons were related to the technical condition of the aircraft, at the beginning of the XXI century this ratio is 90:10 [1]. Regarding maritime transport, according to maritime statistics, 60 % of accidents worldwide are associated with the human factor [2]. According to studies [3; 4], the largest number of accidents occurs due to erroneous human actions, the complexity of technology and its growth, the emergence of unexplored technical failures and violations. At the same time, in order to prevent accidents, human capabilities increase due to improved education, advanced training, exchange of experience, increased stress resistance and the level of industrial culture, etc.

Statement of the problem. The complexity of the issue lies in the fact that it is in the sphere of interest of several scientific aspects (psychology, medicine, economics, technical sciences and legal sciences, etc.) and concerns the study of relationships in the system “human-machine-environment” and its safety. Currently, the issue of the impact of martial law on this system is being raised, especially in areas close to war zones.

Analysis of recent research and publications. Issues of human relationships and ensuring the stability and reliability of transport and logistics systems, the causes of occupational risks, the role of the human factor in the emergence of man-made hazards, the degree of influence of this factor on the mechanism of the accident, and the methods of their quantification were studied [1; 2; 5; 6].

The scientific works consider the research issue in the sectoral aspect and in the context of risk management development. Thus, in [2] the set of factors determining the performance of certain actions by members of maritime transport crews, and their impact on the erroneous actions of staff are identified.

Analytical review of the human factor as a basis for safety of railway transport is studied in [7]. In particular, the authors note that the achievement of reliability and safety of railway transport should be ensured by a system of strict control over the human factor, development of psychosocial assessment of workers and the need for periodic psychophysiological studies of train safety.

In [8] it is determined that the issue of the impact of the “human factor” on the occurrence of railway accidents is diverse and structurally complex. In addition, it is noted that nowadays the most common causes of railway accidents are psychological characteristics and physiological capabilities of human.

The influence of human factors on the safety of motor vehicles in the transport process is studied in [9]. The author emphasizes that this factor is the least studied and most difficult in the safety of the motor vehicle process. Moreover, publications on the human factor often address technical issues of vehicle safety.

The study of the importance of the human factor in the context of ensuring the stability and reliability of transport and logistics systems covers a wide range of relevant scientific aspects. At the same time, despite the in-depth analysis of the research question, the number of factors that negatively affect the state of the human factor and the level of acceptable risk in the transport sector is currently growing in the martial law in Ukraine.

Formulation of the purpose of the article. The purpose of the article is to identify the nature and components of the human factor and the peculiarities of its action in the transport and logistics system in peacetime and wartime.

Research methodology. The following set of scientific methods was used in the study: analysis of scientific and technical literature and regulatory framework for the organization of drivers' work; dialectical method – to reveal the nature of the human factor and the peculiarities of its action in the transport and logistics system; structural analysis – to determine the components of the human factor, the structure and causes of accidents and hazards in the transport sector in military conditions; systemic and synergetic approaches – to determine a number of priority tasks for the development of the human factor in order to ensure the stability and reliability of transport and logistics systems; general logical methods and scenario approach – to improve the conceptual basis of risk management related to the human factor in transport and logistics systems in peacetime and during the Russian-Ukrainian war.

The main material of the article. The term “human factor” began to be used in the late nineteenth century to analyze the causes of accidents and disasters in rail transport and aviation. German psychologist Hugo Münsterberg introduced a concept of “personal factor” in his scientific works in the early twentieth century. “Personal factor” meant the erroneous actions of man while flying. Nowadays, the “personal factor” is understood as the individual influence of a person (personality) on failure (event), and the concept of “human factor” is defined as the impact of all possible participants involved in a particular process (technical systems with which man interacts) on this event. There is no single definition of the term “human factor” in state regulations and standards, but it is used in various interpretations in the field of safety, technology, management, military affairs, etc. [5].

Nowadays, the term “human factor” is mainly used in two senses: 1) to characterize the interaction of a complex system “Human – Technology” as the cause (determinant, factor) of a phenomenon, often negative (traffic accident, plane crash, etc.); 2) as an integrated set and an indicator of the qualitative characteristics of the human component of the combat potential of military formations [6].

Let's analyze the approaches to the definition of the concept of “human factor” existing in the scientific literature (Table 1).

The above definitions reveal the content of the human factor as a whole. In this paper, we analyze the human factor as a holistic system of activities aimed at changing, developing and improving the functioning of the transport and logistics system, as a set of basic qualities and competencies of the employee (professional, physiological, moral and psychological, etc.), his/her conscious or unconscious actions/inaction that can affect/affected the normal functioning of the transport and logistics system, and that appear to increase the risk of accidents or catastrophes.

Table 1

Overview of definitions of the “human factor” in the scientific literature

№	Author	Definitions
1	Zagumenna, N.	a set of basic social qualities of human that have historically developed in society (values, moral principles, norms of behavior, life plans, level of knowledge and awareness, the nature of work and social skills, attitudes and ideas about personally important elements of social life: social justice, human rights and freedom, civic duty [10].
2	Bochkovsky, A.	– certain human characteristics that may cause (or have caused) a violation of the normal process of interaction between the elements of the ergatic system [5]; – conscious or unconscious actions or inaction of a person (group of people) that involve a risk of occurrence (led to the occurrence) of a dangerous event [11].
3	Sobkova, N.	manifestation of the whole set of personal qualities of human, which affect his work activity. This concept indicates the crucial role of man in the process of organization, production and control [12].
4	Meister, D.	a term that describes a person’s ability to make erroneous or illogical decisions in specific situations [13].
5	Panasyuk, I., Mykytenko, L., Danilevich, N.	factor associated with various human roles in solving management problems and should be taken into account by scientists in developing tools for solving such problems (models, methods, mathematical apparatus, methodologies, computer tools, etc.) [14].

Source: developed by the authors based on the analysis [5; 10; 11; 12; 13; 14]

In the field of transport there is a direct interaction of human (drivers and service personnel) and machines (vehicles), which is influenced by both internal and external determinants. In particular, the human factor depends on: social and legal working conditions (current ILO legal norms, national employment policy and ensuring safe working conditions, the policy of an individual transport and logistics company, the terms of the contract with each individual employee); working conditions in the workplace, type of work, relationships with other employees; the state of health and well-being of the employee, the living conditions and the organization of rest; professional knowledge and skills, level of education and training of the employee; state of the transport system and infrastructure, technological development of the transport industry; environmental influences, which include in particular the culture and behavior of traffic participants.

Transport and logistics systems are socio-technical systems such as “Human – Vehicle – Environment” (see Fig. 1).

The human factor has the following components: professional skills and competencies, moral and psychological characteristics, values, cognitive skills of the employee. Human factors is concerned with cognitive processes, such as attention, memory load, distraction, workload, management of interruption, problem solving, computation, judgment, and decision-making.

In order to ensure the development of the human factor, the stability and reliability of transport and logistics systems, it is necessary to solve a set of practical tasks. In particular, first of all it is necessary to pay special attention to: 1) selection of personnel, constant monitoring by the company of the state of employee’s health, efficiency

and reliability of drivers in terms of well-being, attentiveness, stability of mental state and confidence, ability to react quickly in extreme conditions; 2) development of employees' abilities; their certification and promotion, systematic training; 3) use of employees in positions that correspond to their level of qualification; 4) stimulation and encouragement of employees; 5) availability and accessibility for the driver of the necessary information coming from the road, the environment and the vehicle, as well as the ability to perceive and understand the information by the driver; 6) ability to anticipate changes in the road situation to prevent danger; 7) functional state of a person, which is characterized by the efficiency of its activities, the ability to perform certain work, working capacity and professional longevity of human; 8) infallibility of human actions, willingness to work at any time, the ability to perform actions in a timely manner.

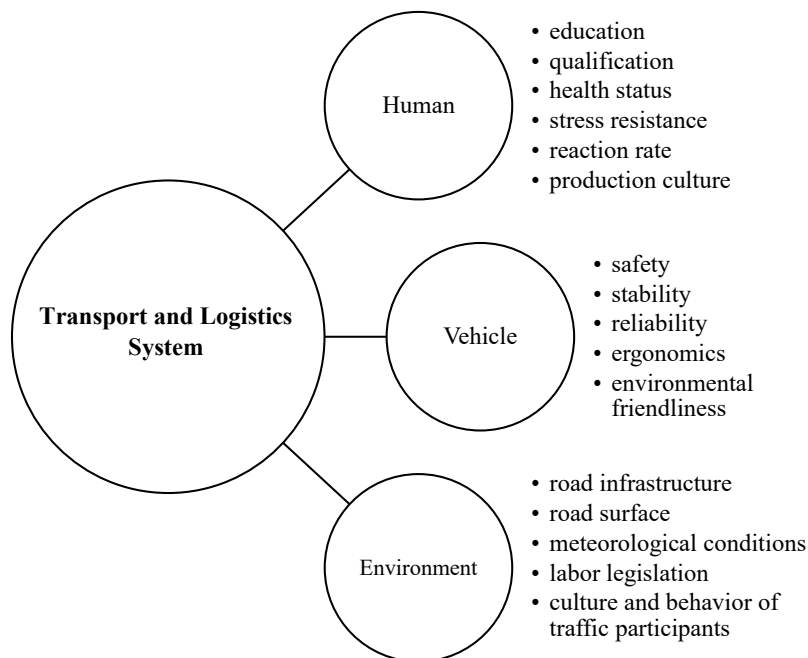


Fig. 1. Components of the transport and logistics system

Source: author's development

Minimizing the impact of the human factor on the transport and logistics system can be achieved through the creation and implementation of a safety management system and mitigation of risks on transport. For example, in peacetime, one of the ways to improve transport safety is the impact on physical ergonomics and anthropometric factors that affect employee productivity and workflow. The human factor is related to the location of the driver's workspace, including the location, size and characteristics of tools such as lighting, vehicle control panel, monitors and other equipment. Anthropometry is especially concerned with understanding human physical change and its impact on productivity. Vehicles and equipment in them must meet the road environment, the needs of road users and the task of safe and comfortable transportation.

Another way to increase transport safety by reducing or eliminating human error is the introduction of automation. These are both vehicle management automation systems and transportation software, so-called “Transport management system (TMS)”.

Automated driver assistance systems for driving are represented by adaptive cruise control and lane-keeping assistance. Such systems are designed to increase the safety of the driver and passengers, the safety of goods during transportation. Full automation also includes environmental monitoring and detection of special driving conditions (eg traffic jams).

Modern TMS meet the following requirements: create realistic routes that can be performed by drivers, and allow drivers to change routes in real time according to changes in traffic; reflect the time of arrival of the vehicle at each destination; allow company to automatically monitor drivers on the routes (location of the truck, engine performance, truck mileage, etc.); calculate the efficiency of the truck fleet that will be involved in the transportation process (when ordering, it is necessary to specify the size of the order, volume and weight characteristics of the cargo, load capacity and body volume of the truck to be submitted for loading).

TMS allows company to save fuel and lubricants by 30 %, to reduce truck mileage by 35 %, to reduce time for planning of routes in 2.5 times, to increase loading of vehicles by 20 %. At the same time, the introduction of navigation systems allows for an objective assessment of the working result of drivers and dispatchers. This eliminates the grounds for potential conflicts in labour collectives, related to the evaluation of work performed, unreasonable provision of more “favorable” conditions and transport tasks, etc. After the implementation of the system, each participant in the transportation process at any time can receive information about the results of his/her work. This completely eliminates the possibility of influencing this process of subjective factors. It is dangerous to over-trust the automated systems in situations that tend to be strange, unpredictable, and hazardous.

Among the risk factors that increase the occurrence of adverse events, accidents, road accidents, damage to cargo can be identified: poor employee training (in particular, non-compliance with the level of employee training to modern technologies and automated systems); increasing workload; employee fatigue; unsatisfactory technical condition of the vehicle; external force majeure factors.

One of such challenges is the full-scale Russian invasion of Ukraine, which complicates the impact of environmental factors, changes the tasks facing the driver. The factor of danger, threat to human life as a result of direct military action in the occupied territories, artillery shelling of vehicles on the line of contact, missile strikes throughout Ukraine come to the fore.

In military conditions, it should be noted the increase in risks associated with: injuries and deaths of participants in the transport and logistics system (drivers, passengers); partial or complete damage to the vehicle during artillery shelling or missile strikes; damage to the transported goods; lack of communication between the driver and the control center due to the destruction of telecommunications infrastructure, lack of mobile communications; the destruction of transport infrastructure (as of April 11, 2022, the total infrastructure damage caused to Ukraine by the Russian invasion is estimated at \$ 119 billion, and the total amount of direct documented infrastructure

damage reached \$ 80.4 billion. Almost 8,000 km of roads, dozens of railway stations, airports were damaged, seaports were blocked, supply chain failures were observed).

During the war, some cities and territories where hostilities are taking place were blocked, which significantly complicates the work of transport and logistics companies. Massive rocket attacks and artillery shelling destroyed a significant number of oil depots and fuel depots, leading to fuel shortages in May 2022. Some transport and logistics companies have stopped working altogether.

Due to constant stress, employees' fatigue increases, their ability to act in extreme situations decreases sharply, which increases the risk of accidents. In particular, on May 3, 2022, 26 people died in an accident involving three vehicles (bus, fuel truck and car) in the village Sitne, Dubna district, Rivne region. The accident was caused by the driver of a car, who was overtaking and drove into the oncoming lane, where he collided with a fuel truck [15]. After this terrible tragedy, the Government of Ukraine decided to resume the operation of video surveillance cameras on the roads of Ukraine.

In conditions when the airspace over Ukraine is closed, seaports are blocked, railway tracks and power lines are destroyed, the main cargo flows are transported by road. Road transport is involved in the transportation of weapons and equipment for the Armed Forces of Ukraine, humanitarian goods and medicines for the population. Evacuation of the population from the combat zones of the russian-occupied territories of Ukraine is also carried out by road. At the beginning of the active hostilities on February 24, 2022, "green" corridors for the delivery of food and priority humanitarian aid to Ukraine were literally formed manually, which significantly increased the burden on both the transport and logistics companies and drivers. It should be noted that during the war, some drivers were mobilized to the Armed Forces of Ukraine or Territorial Defense, some went with their families to safe western regions of the country, some simply refused to go to work if their routes were in places of direct hostilities. This has greatly increased the workload of those workers who remained to work.

As a result, more and more EU countries are easing the work and rest regime for drivers transporting humanitarian goods to Ukraine. This is a deviation from the provisions of EU Regulation 561/2006 on the hours of work and rest of trucks' drivers (Table 2). The first countries to introduce easing were Poland, Belgium and Germany [16]. They were followed by Austria, Denmark, France and Hungary. For example, Austria has allowed the movement of humanitarian goods on its territory on weekends and holidays.

Table 2

Changes in the time of work and rest of trucks' drivers in the EU during the transportation of humanitarian goods in wartime

Indicator	Regulation (EC) No 561/2006 [17]	Changes in legislations due to the Russian-Ukrainian war [16]
The daily driving time shall not exceed	9 hours	11 hours
The weekly driving time shall not exceed	56 hours	60 hours
The total accumulated driving time during any two consecutive weeks shall not exceed	90 hours	96 hours
A driver shall take an uninterrupted break of not less than 45 minutes after a driving period of	four and a half hours	five and a half hours

Source: developed by the authors based on [16, 17]

At the same time, it should be noted that such changes increase the burden on drivers, which increases the risk of accidents. Improper understanding of the situation, making wrong decisions, dangerous actions are the main causes of accidents. Functional reliability of the driver is a decisive factor in ensuring the stability and reliability of the transport and logistics system. Military action reduces the time needed to get out of an emergency. There is a psychophysiological barrier (fear or lack thereof) when the driver is unable to ensure quality performance of professional duties. Errors can be caused by lack of information and physical and psychological condition of the driver. Limited resources and lack of time to make decisions is complicated by the experience of high responsibility for his actions (saving someone's life, delivery of essential goods).

During the war, the main burden of making decisions on the carriage of goods and passengers fell directly on the driver, but the responsibility – on the transport and logistics company. Therefore, it is important for the company to develop and implement an effective system of risk management related to the human factor, and the implementation of a scenario-based measures to prevent and neutralize the risks associated with the human factor (see Fig. 2).

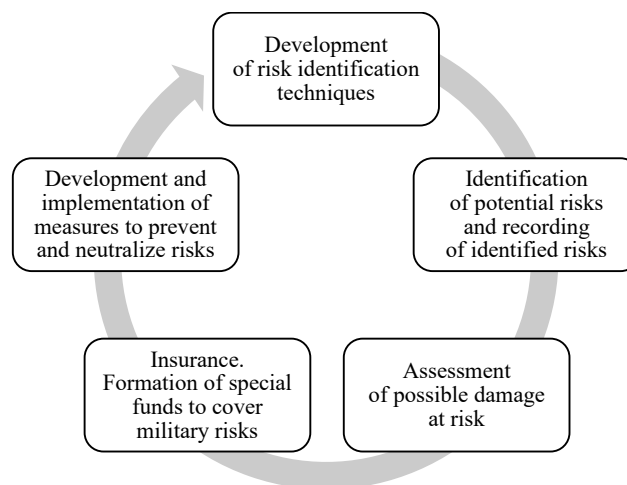


Fig. 2. Risk management system, related to the action of the human factor in transport and logistics systems

Source: developed by the authors based on [18]

Conclusions. In the conditions of military economy and uncertainty the role of the human factor in ensuring stable and reliable functioning of the transport and logistics system is growing. Based on the analysis of scientific approaches and concepts to the definition of the concept of “human factor”, we have identified it as a holistic system of activities aimed at changing, developing and improving the functioning of the transport and logistics system, as a set of basic qualities and competencies of the employee (professional, physiological, moral and psychological, etc.), his/her conscious or unconscious actions/inaction that can affect/affected the normal functioning of the transport and logistics system, and that appear to increase the risk of accidents or

catastrophes. Due to its complexity and versatility, the human factor depends on socio-legal conditions, working and leisure conditions of the employee, his/her professional knowledge and skills, level of preparedness, state of transport system and infrastructure, environment, culture and behavior. The work of the transport and logistics system is interpreted from the standpoint of three components: human, vehicle (machine) and the environment. The human factor has the following components: professional skills and competencies, moral and psychological characteristics, values, cognitive skills of the employee. We have identified a number of important tasks that need to be addressed as a matter of priority for the development of the human factor, ensuring the stability and reliability of transport and logistics systems, in particular: selection of personnel, constant monitoring by the company of the state of employee's health, efficiency and reliability of drivers; development of employees' abilities; availability and accessibility for the driver of the necessary information coming from the road, the environment and the vehicle, as well as the ability to perceive and understand the information by the driver etc.

In the process of research, we came to the conclusion that minimizing the impact of the human factor on the transport and logistics system can be achieved through the creation and implementation of a safety management system and mitigation of risks on transport. For example, in peacetime, one of the ways to improve transport safety is the impact on physical ergonomics and anthropometric factors that affect employee productivity and workflow. The another way is the introduction of automation (vehicle management automation systems and transportation software). During the war, priorities change due to the increased risks associated with injury and death of participants in the transport and logistics system; partial or complete damage to cargo due to missile strikes and shelling, destruction of transport infrastructure. The safety factor comes to the fore, including saving the lives of workers and passengers, saving cargo and finding new logistical safe routes, through the closure of traditional sea and air routes. The main cargo flows are transported by road. Transport and logistics companies face new challenges during the war, in particular due to staff reductions as a result of hostilities. The workload of the remaining staff is growing significantly. This leads to their exhaustion, fatigue and an increase in the number of road accidents and accidents, injuries and deaths of transport participants. Realizing the need to organize transport corridors to help Ukraine, most EU countries have weakened the work and rest regime for drivers transporting humanitarian goods to Ukraine. The paper proposes a scheme for the development and implementation of an effective system for managing the risks associated with the human factor, and the implementation of a scenario-based measures to prevent and neutralize the risks associated with the human factor.

ЛІТЕРАТУРА

1. Павлова С.В., Благая С.В. Аналіз людського фактора під час керування сучасним повітряним кораблем. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2012. № 4. С. 20–25.
2. Гилка У.Л. Виявлення ролі людського фактору в аварійності морського транспорту. *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті* : зб. наук. праць, 2020. № 1 (70). С. 31–43.

3. Каменєв О. Ю. Проблематика підходів до дослідження безпеки використання ергатичних систем керування на залізничному транспорті / О. Ю. Каменєв // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2013. Вип. 2. С. 7–16.
4. Надёжность железнодорожных операторов как фактор безопасности движения / В. Г. Брусенцов, М. И. Ворожбян, О. В. Брусенцов, И. И. Бугайченко, А. В. Гончаров. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2009. № 2. С. 68–72.
5. Бочковський А.П. «Людський фактор» та ризик виникнення небезпек: випадковість чи закономірність : монографія. Одеса : Юридична література, 2015. 132 с.
6. Ілляк О. О. Людський фактор військових формувань: зміст оцінювання та прогнозування : монографія. Харків : Акад. ВВ МВС України, 2012. 252 с.
7. Сидоренко Г.Г, Никифорова О. А. Людський чинник як основа безпеки руху залізничного транспорту: аналітичний огляд. URL: http://tstt.diit.edu.ua/article/view/24457/pdf_30
8. Батіг А. В., Кузишин А. Я. «Людський фактор» як основна причина залізнично-транспортних пригод. *Теорія та практика судової експертизи та криміналістики*. Випуск 19. С. 320–328.
9. Степанов, О.В. Концепція безпеки автомобільних транспортних засобів у транспортному процесі з урахуванням закономірностей впливу фактора людини : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.01. Харків, 2019. 477 с.
10. Загуменна Н. В. Людський фактор та специфіка його активізації у соціально-філософських дослідженнях. *Альманах. Філософські проблеми гуманітарних наук*. 2010. № 16. С. 68–72.
11. Бочковський, Андрій Петрович. *Наукові основи управління ризиками виникнення професійних небезпек* : дис. ... д-ра техн. наук : 05.26.01. Одеса, 2019. 385 с.
12. Собкова Н.Д. Мінімізація впливу людського фактора в системі державного фінансового контролю. *Науковий огляд*. № 2 (23), 2015. С. 5.
13. Meister D. Human factors: theory and practice. New York, 1971.
14. Панасюк І.В., Микитенко Л.І., Данилевич Н.С. Людський фактор у формуванні безпеки праці людини. *Технології та дизайн*. 2012. № 2 (3) С. 3.
15. Лотоцька Н. Кількість жертв ДТП на Рівненщині зросла до 26 осіб, постраждало 12 людей. URL: https://lb.ua/society/2022/05/04/515655_kilkist_z_hertv_dtp_rivnenshchini.html
16. Временное смягчение режима работы и отдыха водителей в Польше. URL: <https://trans.info/ru/vremennoe-smyagchenie-rezhima-raboty-i-otdyiha-voditeley-278398>
17. Regulation (EC) No 561/2006 of the European Parliament and of the Council of 15 March 2006 on the harmonization of certain social

legislation relating to road transport and amending Council Regulations (EEC) No 3821/85 and (EC) No 2135/98 and repealing Council Regulation (EEC) No 3820/85. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex:32006R0561>

18. Микитюк І. Оцінка ризиків у системі внутрішнього фінансового контролю. *Вісник КНТЕУ*. 2011. № 3. С. 42–50.

REFERENCES

1. Pavlova, S., Blagaia, L. (2021). Analysis of the human factor during the management of a modern airship [Analiz liudskoho faktora pid chas keruvannia suchasnym povitrianyim korablem]. Proceedings of the National Aviation University 4, 20–25 [in Ukrainian].
2. Gilka, U. (2020). Identifying the role of the human factor in the accident of maritime transport [Vyivlennia roli liudskoho faktoru v avariinosti morskoho transportu]. Development of methods of management and administration of transport: Collection of scientific works 1 (70), 31–43 [in Ukrainian].
3. Kamenev, O. (2013). Problems of approaches to the study of safety of ergatic control systems in rail transport [Problematyka pidkhodiv do doslidzhennia bezpeky vykorystannia erhatychnykh system keruvannia na zaliznychnomu transporti]. Science and Progress of Transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Rail Transport named after Academician V. Lazaryan 2, 7–16 [in Ukrainian].
4. Brusentsov, V., Vorozhbiyan, M., Brusentsov, O., Bugaychenko, I., Goncharov, A. (2009). Reliability of railway operators as a factor of traffic safety [Nadjozhnost' zheleznodorozhnykh operatorov kak faktor bezopasnosti dvizhenija]. Information and control systems in rail transport 2, 68–72 [in Russian].
5. Bochkovsky, A. (2015). “Human factor” and the risk of hazards: chance or regularity: monograph [“Liudskiy faktor” ta ryzyk vynyknennia nebezpek: vypadkovist chy zakonomirnist]. Legal Literature, Odessa, 132 p. [in Ukrainian].
6. Ilyuk, O. (2012). Human factor of military formations: content of estimation and forecasting: monograph [Liudskiy faktor viiskovykh formuvan: zmist otsiniuvannia ta prohnozuvannia]. Academy of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine, Kharkiv. URL: http://moemesto.ru/stav/file/15147666/Monohraf_Lyudskiy_factor.pdf [in Ukrainian].
7. Sidorenko, G., Nikiforova, O. (2013). The human factor as a basis for safety of railway transport: an analytical review [Liudskiy chynnyk yak osnova bezpeky rukhu zaliznychnoho transportu]. URL: http://tstt.diit.edu.ua/article/view/24457/pdf_30 [in Ukrainian].
8. Batig, A., Kuzyshyn A. (2019). “Human factor” as the main cause of railway accidents [“Liudskiy faktor” yak osnovna prychna zaliznychno-transportnykh pryhod]. Theory and practice of forensic science and criminology. 19, 320–328 [in Ukrainian].

9. Stepanov, A. (2019). The concept of safety of motor vehicles in the transport process, taking into account the patterns of human factors: dis. ... Dr. Tech. Sciences: 05.22.01 [Kontseptsiiia bezpeky avtomobilnykh transportnykh zasobiv u transportnomu protsesi z urakhuvanniam zakonomirnostei vplyvu faktora liudyny]. Kharkiv. URL: https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/Spec_VR_64.059.02/dis_Stepanov.pdf [in Ukrainian].
10. Zagumenna, N. (2010). The human factor and the specifics of its activation in socio-philosophical research [Liudskiy faktor ta spetsyfika yoho aktyvizatsii u sotsialno-filosofskykh doslidzhenniakh]. Almanac. Philosophical problems of the humanities 16, 68–72 [in Ukrainian].
11. Bochkovsky, A. (2019). Scientific foundations of risk management of occupational hazards : dis. ... Dr. Tech. Sciences : 05.26.01 [Naukovi osnovy upravlinnia ryzykamy vynykennia profesiynykh nebezpek]. Odesa [in Ukrainian].
12. Sobkova, N. (2015). Minimization of the influence of the human factor in the system of public financial control [Minimizatsiia vplyvu liudskoho faktora v systemi derzhavnoho finansovoho kontroliu]. Journal of Scientific Review 2 (23), 5 [in Ukrainian].
13. Meister, D. (1971). Human factors: theory and practice. New York.
14. Panasyuk, I., Mykytenko, L., Danilevich, N. (2012). The human factor in the formation of human safety [Liudskiy faktor u formuvanni bezpeky pratsi liudyny]. Technology and Design 2 (3), 3 [in Ukrainian].
15. Lototska, N. (2022) The number of road accident victims in Rivne region has increased to 26 people, 12 people were injured [Kilkist zhertv DTP na Rivenshchyni zrosla do 26 osib, postrazhdalo 12 liudei]. URL: https://lb.ua/society/2022/05/04/515655_kilkist_zhertv_dtp_rivnenshchini.html.
16. Temporary easing of work and rest of drivers in Poland [Vremennoe smjagchenie rezhima raboty i otdyha voditelej v Pol'she]. URL: <https://trans.info/ru/vremennoe-smjagchenie-rezhima-raboty-i-otdyiha-voditeley-278398> [in Russian].
17. Regulation (EC) No 561/2006 of the European Parliament and of the Council of 15 March 2006 on the harmonization of certain social legislation relating to road transport and amending Council Regulations (EEC) No 3821/85 and (EC) No 2135/98 and repealing Council Regulation (EEC) No 3820/85. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex:32006R0561>.
18. Mykytyuk, I. (2011). Risk assessment in the system of internal financial control [Otsinka ryzykiv u systemi vnutrishnoho finansovoho kontroliu]. Visnyk KNTEU 3, 42–50 [in Ukrainian].

**РОЗВИТОК ДИСТАНЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КЕРУВАННЯ СУДНОМ
ЯК ФАКТОР ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОПЛАВСТВА**

**О.М. Мельник¹, О.А. Онищенко², А.О. Волошин³,
Н.В. Васалатій⁴, О.В. Логінов⁵, К.С. Корякін⁶**

¹к.т.н., доцент кафедри судноводіння і морської безпеки,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-9886-6069

²д.т.н., професор кафедри технічної експлуатації флоту,
Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-3766-3188

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

⁴к.г.н., доцент кафедри навігації і керування судном,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-7188-9922

⁵к.т.н., доцент кафедри судноводіння і морської безпеки,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-4540-731X

⁶старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-2388-645X

Анотація

Останнім часом великі надії покладаються на розвиток автоматизованих та автономних суден, як на спосіб вирішення проблем аварійності флоту, спричинених людським фактором, та проблем, пов'язаних з браком кадрів або нестачею кваліфікованих спеціалістів. Штучний інтелект також грає не останню роль, адже для реалізації технологій автономного судноводіння в майбутньому, буде потрібно розроблення і удосконалення процесів, спрямованих на розробку систем автоматичного маневрування, які не будуть обмежуватися набором функцій, що допомагають у процесі маневрування, а будуть містити конкретні алгоритми прийняття рішень та порядок дій для запобігання небезпечному зближенню суден. Метою даної роботи є аналіз передумов виникнення концепції автономного судноводіння, огляд етапів впровадження та перспектив дистанційного керування суднами на основі безпечних технологій, аналіз технічних та інтелектуальних рішень для морських автономних надводних суден. Результати. В представленій роботі розкриті теоретичні аспекти процесу впровадження автономного судноводіння, визначені основні тенденції подальших досліджень, сформульовано коло специфічних технологічних задач, що потребують розв'язання. Висновки. В ході дослідження встановлено, що технології автономного судноводіння потребують подальшої розробки та вдосконалення, особливо в частині вдосконалення протоколів передачі даних, датчиків навігаційної інформації і автоматичних систем

управління рухом, що дозволяє здійснювати моніторинг обладнання з метою поліпшення функцій контролю за рухом автономного судна.

Ключові слова: автономне судно, дистанційні технології керування, безпека судноводіння, контроль руху судна.

DEVELOPMENT OF REMOTE TECHNOLOGIES OF SHIP CONTROL AS A FACTOR FOR ENSURING SHIPPING SAFETY

O.M. Melnyk¹, O.A. Onyshchenko², A.O. Voloshyn³,
N.V. Vasalati⁴, O.V. Lohinov⁵, K.S. Koriakin⁶

¹PhD in Engineering, Senior Lecturer at the Department of Navigation and Maritime Security,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-9886-6069

²Doctor of Engineering, Professor at the Department of Maintenance of Fleet,
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-3766-3188

³PhD in Engineering, Professor at the Department of Navigation and Maritime Security,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-3993-5826

⁴PhD in Geography, Senior Lecturer at the Department of Navigation and Maritime Security,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-7188-9922

⁵PhD in Engineering, Senior Lecturer at the Department of Navigation and Maritime Security,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-4540-731X

⁶Assistant Professor at the Department of Navigation and Maritime Security,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-2388-645X

Summary

Introduction. Nowadays great hopes are laid on development of automated and autonomous ships as a way to solve problems of ship accidents, which are caused by human factor, and to solve the issue of manpower shortage or unavailability of qualified seafarers. There is an opinion, that in order to implement technologies of autonomous ship navigation, in the future it will be necessary to improve the processes, aimed at the development of automatic maneuvering systems, which are not limited to a set of functions that help in the maneuvering process but contain specific algorithms for decision making and actions to prevent unsafe convergence of ships. **The purpose of this work** is to analyze the background of the origin of the autonomous ship navigation concept, review the stages of implementation and the prospects of remote ship control on the basis of crewless technology, the basic tendencies of research, analysis of technical and intellectual solutions for maritime autonomous surface ships. **Results.** This paper covers theoretical aspects of the process of implementation of autonomous ships, identifies the main trends of further research, and formulates a number of specific technological problems that require solutions. **Conclusions.** The research revealed that the technology of autonomous ship navigation requires further development and improvement, especially in the data transmission protocols, sensors and automatic control systems, which allows

the monitoring of the equipment with the aim of improving the control function of the autonomous ship.

Key words: *autonomous ship, remote control technologies, crewless navigation, ship control.*

Постановка проблеми. Процес адаптації програмного забезпечення, електронних систем керування, оптичних і цифрових засобів моніторингу, а також засобів супутникового зв'язку для автономних суден – серед завдань, які потребують пошуку перспектив вдосконалення та розробки технічних рішень. Забезпечення надійного та безпечного функціонування таких суден в автономному режимі, вимагає розробки моделей і методів забезпечення їх безаварійної навігації як для процесів розходження та маневрування суден, так і вдосконалення систем автоматичного управління їх рухом та курсовою стійкістю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням впровадження технологій автономного судноводіння і принципам функціонування бортових систем керування автономним судном присвячені праці численних вчених. Автономне судноплавство та його вплив на правила і стандарти безпеки у галузі, специфіка експлуатації автономних суден вивчено у [1–4]. Методам управління безпекою під час експлуатації дистанційно керованих суден присвячено [5; 6]. У [7–9] досліджено використання інфрачервоного випромінювання, як системи допомоги при швартуванні, вивчено методи керування автономним судном та проблеми, що виникають при їх експлуатації. Роботи, що присвячені впровадженню концепції автономного судноводіння, питанням автономної морської навігації, в межах вирішення задач по знаходженню оптимального та безпечного маршруту автономного судна та руху автономного судна за побудованим маршрутом зі збереженням морехідних якостей та контролем відхилення від маршруту [10–15]. Інші питання [15–20], що присвячені дослідженням основ забезпечення безпечної експлуатації суден та аналізу системно-теоретичної структури управління безпекою судноплавства. Таким чином визначення шляхів реалізації концепції безпілотних суден в контексті з електронною та автономною навігацією серед актуальних завдань, які потребують подальших досліджень.

Виклад основного матеріалу. Морські перевезення є похідною від попиту на товари, основною метою якої є підтримка торгівлі, бізнесу та комерційних відносин у різних масштабах, як глобальних так і внутрішніх. За останніми оцінками, 89,5 % світової торгівлі здійснюється завдяки використанню морського транспорту. Згідно з даними ЮНКТАД, у 2020 році численність світового торговельного флоту зросла на 3 % і налічувала 99800 суден загальною складністю, валовою місткістю більше 100 брутто реєстр. тон. Протягом наступного 2021 року ця тенденція зростання продовжувалась. Станом на січень 2021 року провізна спроможність становила 2,13 млрд тон дедвейту. Але варто додати, що обсяги постачання суден дещо скоротилися, частково через режим ізоляції покликаний пандемією та з причини браку робочої сили, які вносили корективи в роботу морської галузі. Серед суден, зданих в експлуатацію основна частка припадала на балкери, за ними прямували нафтові танкери та контейнеровози. В умовах обмеженої пропозиції суден власники та оператори також купували більше старих суден, що викликало зростання

цін. У 2021 році зросли і темпи утилізації суден, хоча порівняно з попередніми роками вони залишаються низькими. Також протягом року замовлення на нові судна скоротилися на 16 %, демонструючи продовження знижувальної тенденції, яка спостерігалася у попередні роки. Водночас на початку 2021 року судноплавні компанії відреагували на брак провізної здатності різким збільшенням нових замовлень, особливо на судна контейнеровози, замовлення на які досягли найвищого за останні два десятиліття рівня. Також аналогічні показники замовлень і на будівництво газозовів. Відповідно збільшення чисельності світового флоту неминуче до зростання попиту на кваліфіковані морські кадри, проблеми з постачанням яких вкрай актуальні. За останніми статистичними даними, у 2021 році дефіцит офіцерів на судах торговельного флоту вже складав 26 240 осіб, тоді як за попередні п'ять років він прогнозувався лише на рівні 16 500 осіб.

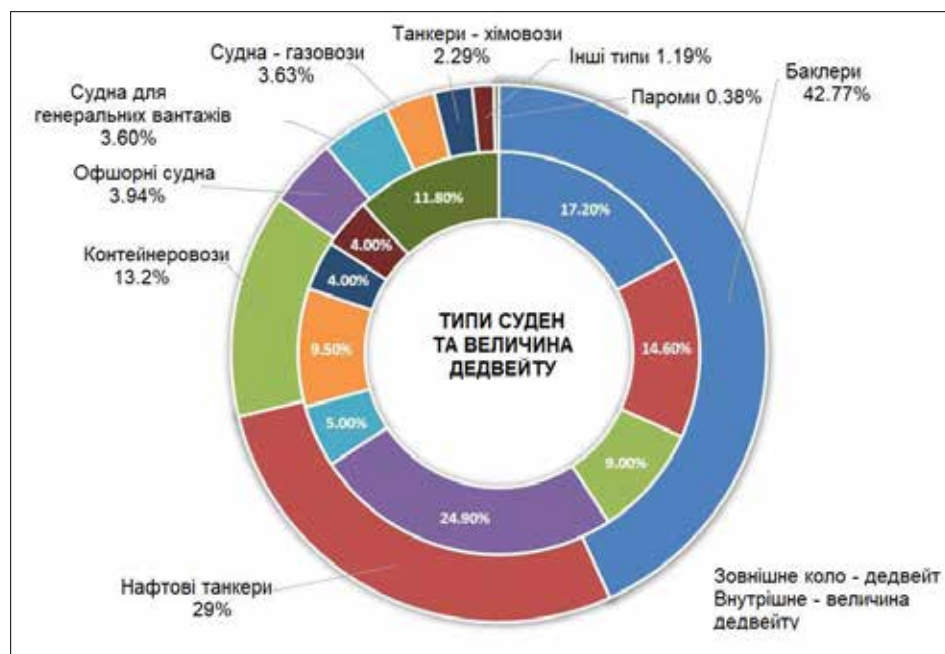


Рис. 1. Світовий морський торговельний флот за типами суден 2022 р.

З кінця минулого століття спостерігається експоненційний розвиток морських технологій, які так чи інакше в перспективі змінять класичне розуміння системи судноплавства, і разом з цим організацію процесу керування суднами. На даний момент, слід виділити три найпомітніші тенденції, які визначатимуть подальший курс на цифровізацію судноплавної галузі, а саме смарт технології, які будуть здатні контролювати всі системи судна, зелені технології в судноплаванні, які підвищують екологічні стандарти, та поява безпілотних або безекіпажних суден. З приводу цього, останнім часом у різних країнах світу ведуться активні дослідження та розробки, включаючи демонстраційні експерименти, з метою практичного застосування суден-прототипів, які більш відомі як морські автономні надводні судна (МАНС), тобто безпілотні автономні судна. Незважаючи на

деякі відмінності в рівні зацікавленості кожної з країн, цілі досліджень і розробок у сфері МАНС можна класифікувати саме як розробка заходів щодо підвищення безпеки експлуатації суден, а також зниження навантаження щодо керування судном на екіпаж. Паралельно цим задачам просліджується ідея використання таких суден, як відповідь на нестачу моряків. Серед інших трендів: це зниження впливу на довілля, зниження вартості експлуатації суден. Перелічене можна об'єднати в чотири ключові тенденції, а саме:

- а) повсюдне впровадження нових досягнень науково-технічного прогресу;
- б) прогнозована нестача кваліфікованих кадрів для морської галузі;
- в) прагнення максимально знизити вплив людського фактору з метою ефективного забезпечення безпеки на морі;
- г) природне бажання судновласників заощадити на одній із суттєвих витрат – утримання екіпажу.

Все це зумовило появу та стрімкий розвиток абсолютно нового, з погляду на принципи керування, типу суден – морських автономних надводних суден.

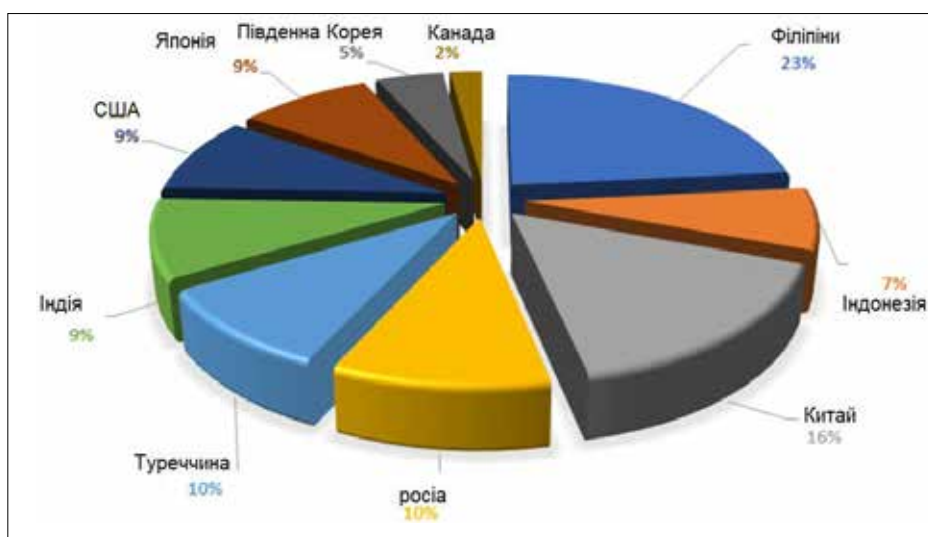


Рис. 2. Затребуваність морських офіцерів відповідно до основних країн постачальників кадрів на світовому ринку праці 2021 р.

Офіційне визначення щодо термінології МАНС та його значення, що використовується на сучасному етапі, можуть відрізнитися, оскільки визначення МАНС все ще знаходиться на стадії вивчення ISO/AWI 23860 у Міжнародній організації зі стандартизації. Однак слід розібратися в поняттях та дати визначення дефініціям автоматизоване судно, автономне судно та безпілотне судно.

Автоматизоване судно означає конвенційне судно, у процесі виробничої діяльності якого використовується будь-який тип автоматичної функції керування, через що воно здатне здійснювати навігаційні переходи без безпосереднього керування людиною, а за допомогою пристроїв, пов'язаних з навігацією, керуванням рухом судна та його силовою установкою.

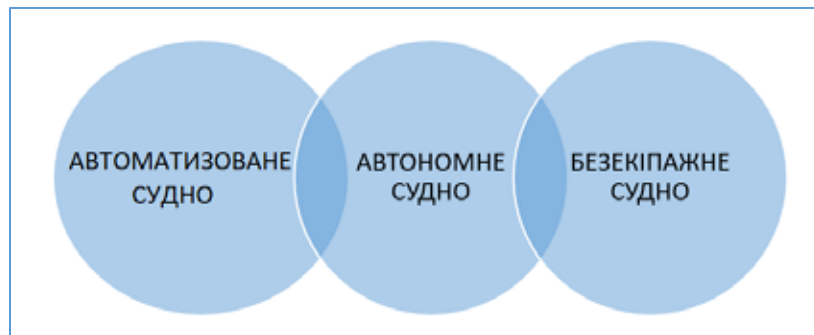


Рис. 3. Основні типи безпілотних суден

Наступним етапом є автономне судно, під яким слід розуміти автоматизоване судно, яке облаштовано системою розпізнавання об'єктів навколо судна за допомогою різних типів датчиків, визначення ступеня небезпеки об'єктів відповідно до наявності ризику зіткнення. А також алгоритмів здійснення заходів у вигляді маневру щодо уникнення зіткнення з об'єктами, якщо така небезпека існує, та повернення на заданий курс після завершення дій щодо ухилення, можуть бути виконані автоматично без втручання людини. Як відома система керування курсом судна та утримання його заданому курсі не мають когнітивної функції розпізнавання об'єктів та уникнення перешкод, тому автоматична система керування, що включає цю когнітивну функцію, стала важливою характеристикою таких суден і подальшого розвитку технології у цьому напрямку. Втім такі технології стосуються лише суден, які проектується з функціями, що забезпечують виконання операції, які пов'язані з процесом керуванням судна без втручання людини, і не пов'язані з фактом наявності екіпажу на борту, який може виконувати операції з маневрування.

Безекіпажне (безпілотне) судно – це судно, на якому немає фізичної присутності членів екіпажу, і воно у свою чергу є різновидом автоматизованого судна. Такий тип судна або оснащений функціями вищезгаданого автономного судна, на якому здійснюються процес судноводіння на основі команд для маневрування на судно, які передаються від людини-оператора, що знаходиться у віддаленому місці за допомогою супутникових засобів зв'язку. Слід підкреслити, що хоча визначення такого типу судна означає безекіпажне (хоча від цієї термінології поступово відходять), воно може перевозити пасажирів. Враховуючи можливість втрати або переривання зв'язку з віддаленим центром управління, можна припустити, що такий тип буде оснащений функціями автономного судна. Водночас судно, яке не оснащено функціями автономного плавання, але керується дистанційно шляхом передачі навігаційних команд, пов'язаних з роботою систем керування його рухом, також може бути класифіковано як безпілотне навігаційне судно, за умови, що на ньому немає екіпажу, який може виконувати маневрені операції.

Берегова станція супроводу – центр дистанційного керування судном, один з важливих компонентів, який також має суттєві особливості у процесі випробувань даних технологій. Будучи аналогом диспетчерської вежі цей істотний елемент відіграє першорядну роль у процесі трансформації технологій автономного

судноводіння в комерційну реальність, збираючи метеорологічні та навігаційні дані, а також іншу інформацію з безпеки мореплавання, контролюючи робочий стан судна, його систем та стан машинного відділення, дозволяючи керувати судном як дистанційно з використанням супутникових технологій, включаючи випадки надзвичайних ситуацій, так і супроводжуючі судно і контролюючи його під час портових операцій із повноцінним використанням каналів зв'язку «земля-море», з наданням підтримки у будь-який момент часу.



Рис. 4. Схема управління процесами МАНС

Системи керування МАНС та утримання його на заданому курсі, які вже встановлені на багатьох існуючих судах, є прикладами функцій автоматичного керування, і судно, яке здійснює навігацію з використанням цих функцій, також є судном з автоматичною навігацією. Як описано вище, автономне судно та безпілотне судно також використовують функції автоматичного керування і таким чином є типами автоматизованого судна у якому реалізовані наступні функції: плавання за заданим курсом з певною швидкістю, уникання перешкод, маневри по розходженню, прискорення та уповільнення швидкості ходу, перехід із стану плавання в стан якірної стоянки, перехід із стану на якорі в стан плавання шляхом та швартувальні операції в порту.

Напевно найголовнішою проблемою в сучасних умовах щільного суднопотоку залишається вдосконалення технологій уникнення перешкод або маневри з розходження під час плавання, де першою вимогою є функція виявлення перешкод на маршруті МАНС. Ця функція виявлення не обмежується лише виявленням інших суден, але також включає судна що не мають ходу відносно води (некеровані судна), судна з обмеженою здатністю маневрувати тощо, а також рибальські мережі та буї, плавучі об'єкти та буї каналу. У даному випадку завдання що постає, це необхідність оцінки відмінностей в порядку пріоритету залежно від ситуації зустрічі та умов навігації, і відповідно визначення алгоритмів уникання небезпечного зближення або зіткнення. Тому щодо технологій виявлення

перешкод у багатьох країнах ведеться розробка систем, що використовують штучний інтелект (ШІ). В даний час ведеться робота над системою оцінки перешкод, яких слід уникати, і перешкод, яких не потрібно уникати, наприклад водоплавних птахів тощо, але в майбутньому очікується, що автоматичне виявлення ШІ стане можливим тому мінімальною функцією уникнення перешкоди слід вважати ідентифікацію перешкоди і зупинку судна заздалегідь до того, як воно зіткнеться з перешкодою. Що стосується автоматизованого швартування до причалу та відшвартування судна, процес керування або процес маневрування судна можна спростити, забезпечивши відповідні причали для автоматизованих суден. Цілком зрозуміло, що контроль маршруту переходу судна ведеться за допомогою встановлених камер відеоспостереження, які забезпечують функції, необхідні для управління рухом МАНС.

Питання зниження витрат протягом ходового часу за рахунок розробки та впровадження більш точних систем управління рухом судна та утримання його на заданому курсі, а також зменшення гальмівної дії корпусу та керма залишаються серед актуальних завдань. Багато технічних і дослідницьких центрів займаються розробкою систем автоматичного рульового керування для використання на дистанційно керованих автономних суднах, які будуть використовуватися в навігаційних системах і системах управління рухом та стабілізації курсу суден у межах комп'ютеризації процесу керування МАНС. Такі системи використовують автоматичну систему для керування судном на ходу, включаючи алгоритми маневрування відповідно до Міжнародних правил запобігання зіткненням суден у морі (COLREG). Система має три режими: режим стеження, режим курсу та повільне керування джойстиком. У «режимі стеження» система веде судно за заздалегідь узгодженим маршрутом. Якщо МАНС виявляє інше судно, для розходження з яким слід використовувати маневрування, система перемикається в «режим маневру», який дозволяє виконувати необхідні маневри для ухилення від іншого судна, змінюючи курс судна. Далі система повертається в «режим курсу» після того, як небезпека зникає. Коли функція джойстика активована, елементи керування та силове обладнання налаштовані на маневрування на низькій швидкості, що дозволяє керувати системами за допомогою джойстика, наприклад, маневрувати судном біля причалу. Автопілот запрограмований таким чином, щоб судно завжди залишалося на заданій відстані від запланованого маршруту. Якщо ці межі перевищено, автопілот видає попередження, і в такому випадку режим дистанційного керування скасовується.

Для натурних випробувань об'єктами моделювання обираються судна невеликої водотоннажності, у рульовій системі яких встановлюється малоінерційний електрокерований поворотний пристрій. У цьому пристрої практично відсутнє обмеження по частоті повороту керма, що дозволяє створювати вискоелективні системи автоматичного утримання судна на заданому курсі, в яких максимальний кут повороту керма становить 35 градусів.

Структура даної системи характеризується передаточною функцією, яка описує її властивості. Проведена попередня ідентифікація параметрів об'єкту дозволяє прийняти для моделювання такі параметри передавальних функцій системи стабілізації.

a) Рульовий пристрій МАНС;

$$W_{PI}(C) = \frac{20}{0,2s + 1}. \quad (1)$$

Конструктивна модель рульового приводу враховує обмеження вихідного сигналу $\pm 35^\circ$.

b) Судно (МАНС);

При номінальних умовах експлуатації судна:

$$W_{НОМ}(C) = \frac{1,4s + 1}{41s^2 + 14s + [1 + H(s)]}. \quad (2)$$

Коефіцієнти K , v_1 , v_2 , що входять до виразу $H(s)$, практично не змінюються в залежності від стану завантаження судна. Тому вони вважаються постійними для будь-яких умов експлуатації судна ($K = 0,93$, $v_1 = -0,016$, $v_2 = 0,0014$).

c) Негативний відгук;

$$W_{HB}(C) = \frac{1,0}{0,1s + 1}. \quad (3)$$

d) Вітрові та хвильові збудження;

Збурення, які відхиляють курс судна від заданого значення, можна описати сумою трьох-чотирьох синусоїдальних сигналів різної амплітуди, частоти та фази.

e) ПИД – регулятор (Пропорційно-інтегральний регулятор);

Для оцінки властивостей системи стабілізації курсу судна параметри ПИД приймаються постійними для достатньо великих змін передатної функції $W_{НОМ}(C)$. Виконано синтез настроювальних параметрів ПИД-регулятора з обмеженням вихідного сигналу на рівні 10 град. для зазначених вище передатних функцій судна, рульової машини та датчика зворотного зв'язку. До налаштування ПИД-регулятора висуваються наступні вимоги: перерегулювання не більше 1,5 з мінімальним часом перехідного процесу $W_{НОМ}(C)$, передавальна функція ПИД-регулятора має наступні значення параметрів налаштування.

$$W_{ПИД}(C) = P + I / C + D \frac{N}{1 + N / C}, \quad (4)$$

Пропорційна складова: $P = 0,013$, інтегральна складова $I = 0,0016 \text{ с}^{-1}$, диференціальна складова: $D = 0,08 \text{ с}$, коефіцієнт фільтрації: $N = 0,9$.

Таким чином, в результаті застосування даної моделі в прототипах МАНС було продемонстровано підвищення точності курсової стабілізації, яка збільшується на 10–17 % при зниженні частоти перекладання керма на 8–12 % і зменшенні витрат палива (за середньостатистичний рейс і середні статистичні збурення вітрового і хвильового впливу для конкретного району плавання) на 3–7 %.

Висновки. Слід визнати той факт, що процес вироблення законодавства та створення нормативів страхування для автономних суден займає більш істотну частку часу ніж розроблення та впровадження самих технологій дистанційного керування. Тим не менш, в першу чергу можуть бути змінені вимоги щодо мінімально необхідної кількості осіб на борту, незалежно від того, чи є ці судна повністю автономними, чисельність екіпажу буде скорочуватися через впровадження навігаційних систем, оснащених автоматизованими засобами запобігання зіткненню суден. Але паралельно з цим існує потреба в розробці програмного забезпечення для обробки значних обсягів інформації, аналітика та телеметрія можливих проблем з прототипами, їх датчиками, двигунами, кермовим пристроям та інше, що можливість на основі аналізу цих даних передбачувати періоди необхідної заміни вузлів та механізмів, планувати техобслуговування та як результат, запобігати аварійності обладнання. З іншого боку, необхідно активно розвивати діяльність із розробки стандартів і правил, починаючи з етапу розвитку технологій. Також за необхідне є вжиття заходів, спрямованих на міжнародну стандартизацію, включаючи узагальнення вимог щодо безпеки для реалізації проектів безпілотних суден, розробку положень щодо страхування та правових засад у відповідності до всіх міжнародних конвенцій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Shimizu E. Recent (2021) Trends and Issues for Practical Application of MASS. Class NK Technical Journal No. 3
2. Alsos, Ole & Hodne, Philip & Skåden, Oskar & Porathe, Thomas. (2022). Maritime Autonomous Surface Ships: Automation Transparency for Nearby Vessels. Journal of Physics: Conference Series. 2311. 012027. 10.1088/1742-6596/2311/1/012027.
3. Огляд морського транспорту – 2021, Організація Об'єднаних Націй. URL: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2021summary_ru.pdf
4. Rokseth, Børge & Haugen, Odd & Utne, Ingrid. (2019). Safety Verification for Autonomous Ships. MATEC Web of Conferences. 273. 02002. 10.1051/mateconf/201927302002.
5. Yang, Ruochen & Utne, Ingrid. (2022). Towards an online risk model for autonomous marine systems (AMS). Ocean Engineering. 251. 111100. 10.1016/j.oceaneng.2022.111100.
6. Bremnes, Jens & Norgren-Aamot, Petter & Sørensen, Asgeir & Thieme, Christoph & Utne, Ingrid. (2019). Intelligent Risk-Based Under-Ice Altitude Control for Autonomous Underwater Vehicles. 1–8. 10.23919/OCEANS40490.2019.8962532.
7. Nakarith N. and P. Iamraksa, “The study of using infrared as docking aid system for boat”, In: Proceedings of the ACDT 2015, The 1st Asian Conference on Defense Technology.
8. Filimonov V. “Autonomous ships and the difficulties of their operation”, Baltic Lloyd (2020).
9. Yudin Y., Gololobov A., Stepakhno A. “Method of Parameter Calculation of Mathematical Model of Vessel”, MGTU Bulletin (2009), 12, pp. 5–9.

10. Chong J. C. “Impact of maritime autonomous surface ships (MASS) on VTS operations”, World Maritime University Dissertations (2018) Malmo, Sweden.
11. Pietrzykowski Z., Hajduk J. “Operations of Maritime Autonomous Surface Ships”, TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (2019) 13, pp. 725–733.
12. I. Kurt and M. Aymelek, “Operational and economic advantages of autonomous ships and their perceived impacts on port operations”, Maritime Economics & Logistics (2022) 24.
13. T. E. Kim, L. Perera, M. P. Sollid, B. M. Batalden, and A Sydnes, “Safety challenges related to autonomous ships in mixed navigational environments”, WMU Journal of Maritime Affairs (2022).
14. L. P. Perera, “Deep Learning Toward Autonomous Ship Navigation and Possible COLREGs Failures”, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering (2020) 143, 3.
15. T. E. Kim and S. Mallam, “A Delphi-AHP study on STCW leadership competence in the age of autonomous maritime operations”, WMU Journal of Maritime Affairs (2020) 19, pp. 163–181.
16. Melnyk, O., Onyshchenko S., Pavlova N., Kravchenko O., Borovyk S. (2022) Integrated Ship Cybersecurity Management as a Part of Maritime Safety and Security System. International Journal of Computer Science and Network Security, vol. 22 (03), 135–140. <https://doi.org/10.22937/IJCSNS.2022.22.3.18>.
17. Burmaka, I., Vorokhobin I., Melnyk, O., Burmaka, O., Sagin, S. (2022) Method of Prompt Evasive Maneuver Selection to alter Ship’s Course or Speed, Transactions on Maritime Science, 11(1). DOI: 10.7225/toms.v11.n01.w01.
18. 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 2022, pp. 136–146. <https://doi.org/10.21279/1454-864X-22-11-015>
19. Мельник О.М. Сучасна методика оцінки рівню безпеки судна та шляхи його підвищення. *Розвиток транспорту*. 2021. № 2 (9). С. 37–46. <https://doi.org/10.33082/td.2021.2-9.03>.
20. Мельник О.М. Врахування фактору стресу у системі забезпечення безпеки мореплавства. *Вчені записки ТНУ ім Вернадського. Технічні науки*. 2021. 32(71) № 4. С. 260–264. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/39>

REFERENCES

1. Shimizu E. Recent (2021) Trends and Issues for Practical Application of MASS. Class NK Technical Journal No. 3
2. Alsos, Ole & Hodne, Philip & Skåden, Oskar & Porathe, Thomas. (2022). Maritime Autonomous Surface Ships: Automation Transparency for

- Nearby Vessels. *Journal of Physics: Conference Series*. 2311. 012027. 10.1088/1742-6596/2311/1/012027.
3. Review of maritime transport – 2021, United Nations Organization. URL: https://unctad.org/system/files/officialdocument/rmt2021summary_ru.pdf
 4. Rokseth, Børge & Haugen, Odd & Utne, Ingrid. (2019). Safety Verification for Autonomous Ships. *MATEC Web of Conferences*. 273. 02002. 10.1051/mateconf/201927302002.
 5. Yang, Ruochen & Utne, Ingrid. (2022). Towards an online risk model for autonomous marine systems (AMS). *Ocean Engineering*. 251. 111100. 10.1016/j.oceaneng.2022.111100.
 6. Bremnes, Jens & Norgren-Aamot, Petter & Sørensen, Asgeir & Thieme, Christoph & Utne, Ingrid. (2019). Intelligent Risk-Based Under-Ice Altitude Control for Autonomous Underwater Vehicles. 1–8. 10.23919/OCEANS40490.2019.8962532.
 7. N. Nakarith and P. Iamraksa, “The study of using infrared as docking aid system for boat”, In: *Proceedings of the ACDT 2015, The 1st Asian Conference on Defense Technology*.
 8. V. Filimonov. *Autonomous ships and the difficulties of their operation*. Baltic Lloyd (2020).
 9. Y. Yudin, A. Gololobov and A. Stepakhno, “Method of Parameter Calculation of Mathematical Model of Vessel”, *MGTU Bulletin* (2009), 12, pp. 5–9.
 10. J. C. Chong, “Impact of maritime autonomous surface ships (MASS) on VTS operations”, *World Maritime University Dissertations* (2018) Malmo, Sweden.
 11. Z. Pietrzykowski and J. Hajduk, *Operations of Maritime Autonomous Surface Ships*. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* (2019) 13, pp. 725–733.
 12. I. Kurt and M. Aymelek, “Operational and economic advantages of autonomous ships and their perceived impacts on port operations”, *Maritime Economics & Logistics* (2022) 24.
 13. T. E. Kim, L. Perera, M. P. Sollid, B. M. Batalden, and A. Sydnes, “Safety challenges related to autonomous ships in mixed navigational environments”, *WMU Journal of Maritime Affairs* (2022).
 14. L. P. Perera, “Deep Learning Toward Autonomous Ship Navigation and Possible COLREGs Failures”, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (2020) 143, 3.
 15. T. E. Kim and S. Mallam, “A Delphi-AHP study on STCW leadership competence in the age of autonomous maritime operations”, *WMU Journal of Maritime Affairs* (2020) 19, pp. 163–181.
 16. Melnyk, O., Onyshchenko S., Pavlova N., Kravchenko O., Borovyk S. (2022) *Integrated Ship Cybersecurity Management as a Part of Maritime Safety and Security System*. *International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 22 (03), 135–140. <https://doi.org/10.22937/IJCSNS.2022.22.3.18>.

17. Burmaka, I., Vorokhobin I., Melnyk, O., Burmaka, O., Sagin, S. (2022) Method of Prompt Evasive Maneuver Selection to alter Ship's Course or Speed, Transactions on Maritime Science, 11(1). <https://doi.org/10.7225/toms.v11.n01.w01>.
18. 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 2022, pp. 136–146. <https://doi.org/10.21279/1454-864X-22-II-015>
19. Melnyk O., Bychkovsky Yu. (2021). Modern methods of ship safety level assessment and ways of its improvement. Transport development. No. 2 (9). P. 37-46. <https://doi.org/10.33082/td.2021.2-9.03>.
20. Melnyk O., Bychkovsky Yu. (2021). Consideration of stress factor in the system of ensuring safety of navigation. Notes of Vernadsky TNU. Technical sciences. 32(71) № 4. С. 260–264. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/39>.

ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ МОРСЬКИХ ПОРТІВ: ПРОЄКТИ ТА ІНІЦІАТИВИ

Д.М. Решетков¹, Н.Л. Павлова²

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

²к.т.н., доцент кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-7528-2370

Анотація

Вступ. Порти представляють собою важливі логістичні центри, що впливають як на морський сектор, так і на міста. Дії щодо їх декарбонізації можуть мати вирішальне значення для стимулювання змін в інших сегментах морського сектора та, у свою чергу, мінімізувати вплив їх діяльності на навколишнє середовище у містах та їх околицях. Дослідження та проєкти, що присвячені вивченню проблем декарбонізації спрямовані на скорочення викидів вуглецю, використання поновлюваних джерел енергії, оптимізацію витрат і продуктивності, впровадження технологій інтелектуального управління, створення відповідної нормативно-правової бази. Знання та застосування передового світового досвіду у галузі портового сектору сприятиме його стійкому розвитку в Україні. Метою статті є огляд проєктів та ініціатив з декарбонізації морських портів, визначення основних напрямків зазначеного процесу. Результати. У статті проаналізовано основні проєкти з декарбонізації морських портів та передову практику в галузі соціальної та екологічної стійкості в портовому секторі. В результаті аналізу, визначено основні напрями, які призведуть до зневуглецювання портів і навколишніх територій та сприятимуть процесу перетворення портів у центри зневуглецювання. Встановлено ключеві фактори, визначено можливості для портів України внаслідок їхньої декарбонізації. Висновки. У цій статті визначено, що ключовими факторами, що сприяють декарбонізації морських портів, є: використання відновлюваних ресурсів, оптимізація витрат, впровадження інтелектуальних технологій, встановлення правил та положень щодо екологізації морських портів. Встановлено, що впровадження керівних принципів практики «зелених морських портів», використання передового досвіду в цій галузі дозволить портам України швидше перейти у своїй практиці на найкращі світові стандарти.

Ключові слова: декарбонізація, екологічно чиста енергія, економіка замкнутого циклу, зелений порт, розумний порт.

DECARBONIZATION OF SEAPORTS: PROJECTS AND INITIATIVES

D.M. Reshetkov¹, N.L. Pavlova²

¹PhD, Associate Professor,
Professor of the Department “Port Operation and Cargo Handling Technology”,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-7281-962X

²PhD, Associate Professor of the Department
“Port Operation and Cargo Handling Technology”,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-7528-2370

Summary

Introduction. Ports are important logistics centers that affect both the maritime sector and cities. Actions to decarbonize them can be critical to drive change in other segments of the maritime sector and, in turn, minimize the environmental impact of their activities in and around cities. Research and projects dedicated to the study of decarbonization problems are aimed at reducing carbon emissions, using renewable energy sources, optimizing costs and productivity, implementing intelligent management technologies, and creating an appropriate regulatory and legal framework. Knowledge and application of world-leading experience in the field of the port sector will contribute to its sustainable development in Ukraine. Purpose of the article is to review projects and initiatives for the decarbonization of seaports, to determine the main directions of the mentioned process. Results. The article analyzes the main projects for the decarbonization of seaports and best practices in the field of social and environmental sustainability in the port sector. As a result of the analysis, the main directions that will lead to the decarbonization of ports and surrounding territories and will contribute to the process of transforming ports into decarbonization centers have been determined. The key factors were established, the opportunities for the ports of Ukraine as a result of their decarbonization were determined. Conclusions. In this article, it is determined that the key factors contributing to the decarbonization of seaports are: the use of renewable resources, cost optimization, the implementation of intelligent technologies, and the establishment of rules and regulations for the greening of seaports. It has been established that the implementation of the guiding principles of the practice of “green seaports”, the use of best practices in this field will allow the ports of Ukraine to quickly move to the best international standards in their practice.

Key words: decarbonization, ecologically clean energy, closed cycle economy, green port, smart port.

Вступ. Глобальне потепління визнано однією із основних проблем людства [1]. Боротьба із зміною клімату на планеті давно стала основним напрямком у більшості розвинених країн. Проблема глобального потепління, що спричинено викидами діоксиду вуглецю (CO₂), знайшла своє відображення у 2015 році, коли 196 країн приєдналися до документа «Паризька угода», що впроваджує різні заходи із зменшення викидів CO₂ з 2020 року. Декарбонізація зачіпає різні галузі промисловості та транспорту, при цьому портовий сектор не є винятком.

Постановка проблеми. Портова галузь динамічно розвивається в Україні. Разом з цим порти стикаються зі зростаючим тиском зменшення свого вуглецевого сліду при одночасному підвищенні енергоефективності і глобальної конкурентоспроможності. Така ситуація спонукає до розробки проєктів та ініціатив щодо декарбонізації їх енергетичних систем. Знання та застосування передового світового досвіду у цій галузі сприятиме стійкому розвитку портового сектору в Україні.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Існуючі дослідження та проєкти, що реалізуються в даний час, спрямовані на скорочення викидів вуглецю, використання поновлюваних джерел енергії, оптимізацію витрат і продуктивності, впровадження технологій інтелектуального управління, створення відповідної нормативно-правової бази. Так, Ateyah Alzahrani, Ioan Petri, Yacine Rezgui [2] в своїй роботі дослідили шляхи, за допомогою яких порт Роттердам зможе зберегти свою сильну позицію, значно скоротивши викиди CO₂ та пов'язані з цим ризики до 2050 року. В [3] міститься огляд широкого спектру досліджень щодо декарбонізації у портовій галузі, включаючи минулі та поточні ініціативи. Крім того, слід зазначити, що питання, пов'язані з декарбонізацією портів є у сфері інтересів ряду міжнародних організацій та установ, ними здійснено розробку ряду проєктів [4–11].

Формулювання цілей статті. Метою статті є огляд проєктів та ініціатив з декарбонізації морських портів, а також визначення основних напрямків зазначеного процесу.

Виклад основного матеріалу.

1. Основні напрямки процесу декарбонізації морських портів. Порти є екосистемами, в яких взаємодіє велика кількість морських, енергетичних, логістичних та транспортних секторів.

В даний час кожен з цих секторів має власні цілі та стратегії декарбонізації для скорочення викидів вуглекислого газу (CO₂) та інших парникових газів. Для декарбонізації портів важливо, щоб усі взаємодіючі сектори узгоджували свої стратегії.

Можна виділити вісім основних напрямів, які призведуть до зневуглецювання портів і навколишніх територій (рис. 1).

Одже, порти є важливими логістичними центрами, що впливають як на морський сектор, так і на міста. Дії щодо їх декарбонізації можуть мати вирішальне значення для стимулювання змін в інших сегментах морського сектора та, у свою чергу, мінімізувати вплив їх діяльності на навколишнє середовище у містах та їх околицях.

2. Концепція інтелектуального порту – «розумний порт». З 2000 року до теперішнього часу морські порти почали вдосконалювати свої операційні системи, маючи на меті стати «розумними портами». Нове бачення інтелектуального порту базується на інтелектуальних та інноваційних технологіях з низьким впливом на експлуатацію та 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.

Напрями	Зміст
1. Електрифікація терміналів і портового транспорту	Використання в діяльності портів електроенергії з відновлюваних джерел для постачання суден, транспортних засобів, техніки та інших елементів порту, що стоять у порту
2. Впровадження нових видів бункерного палива суден	Використання зрідженого природного газу (ЗПГ) як перехідного палива до палива з нульовим рівнем викидів (аміак, водень та ін.) у портовому секторі та морському транспорті
3. Електрифікація морської галузі	Стійке виробництво електроенергії завдяки інноваціям у галузі вітрової та сонячної енергії, накопичення енергії, виробництво низьковуглецевого водню, а також збільшення доступності та зниження цін на вітрову та сонячну електроенергію
4. Інтеграція енергетичної системи	Об'єднання всіх енергетичних мереж (електричні та водневі мережі, сонячна або вітрова енергія) для використання їх потенціалу в цілому та отримання енергетичної незалежності портів
5. Викорінення електростанцій, що працюють на викопному паливі	Поступова відмова від розташованих у великих портах електростанцій, що працюють на викопному паливі та використання площ, що звільнилися, для накопичення запасів зеленого водню або для уловлювання та зберігання
6. Уловлювання та зберігання вуглецю в портах	Використання огорож портів для уловлювання, зберігання та подальшого використання вуглецю контрольованим чином з використанням його як сировини для різних промислових процесів або для експорту в інші країни
7. Розробка нових морських правил	Наявність адаптованої до вимог ЄС та ІМО нормативно-правової бази та політики, спрямованих на сприяння знеуглероженню морського сектора та портів
8. Просування економіки замкнутого циклу	Досягнення економіки замкнутого циклу (продовження терміну служби продуктів та заохочення їх ремонту, повторне використання та переробка та ін.) як кінцевої мети портів, що прагнуть стійкості

Рис. 1. Основні напрями процесу перетворення портів у центри знеуглецювання

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.

У проєкті під назвою «План дій щодо концепції «розумного порту» у Середземноморському регіоні» визначення концепції «розумного порту» зосереджено на трьох основних сферах: експлуатація, використання енергії та навколишнє середовище [6].

Важливість споживання енергії в морських портах пов'язана з високими потребами в енергії для портових операцій. Ефективне використання енергії є проблемою для портової влади, оскільки більше споживання енергії означає збільшення викидів вуглецю та збільшення експлуатаційних витрат.

Отже, більшість портових організацій закликають портову владу встановити портові правила для скорочення споживання енергії та збільшення ресурсів екологічно чистої енергії. Це також допоможе скоротити викиди вуглецю та витрати на електроенергію для систем управління портом.

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.

Влада європейських морських портів вважає якість повітря найбільш важливою з десяти екологічних пріоритетів для морських портів, оскільки якість повітря впливає на роботу портів та судноплавство. В результаті елемент довкілля є важливою областю, яку необхідно враховувати для перетворення портів на інтелектуальні порти.

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

3. **Приклади передової інноваційної практики у морських портах.** Морські порти є ідеальними центрами для стійких морських інновацій та стали ключовою частиною стратегій розвитку, які використовуються багатьма країнами (Rodrigue and Notteboom 2020) [7; 8].

На рис. 2 наведено приклади передової інноваційної практики у морських портах світу, які є привабливими для потенційних інвесторів. Вони можуть бути також цікавими та корисними для сталого розвитку портового сектору в Україні.

4. **Огляд проектів та ініціатив з декарбонізації морських портів.** Морські порти розпочали цифрову трансформацію в рамках програми боротьби з глобальним потеплінням з ключовою метою скорочення викидів вуглецю по всьому ланцюжку створення вартості.

Напрями	Зміст
1. Зелений транспорт	Порти або компанії, які забезпечують екологічно чисте сполучення між портами та внутрішніми районами, які пропонують альтернативи, такі як розвиток залізничного терміналу (Порт Роттердама)
2. Зелені технології	Порти, які мають навички та системи, доступні для підтримки технологій «зелених портів», наприклад, для фінансування розробки «зелених» технологій (Управління Сінгапурського морського та портового центру декарбонізації)
3. Просторове управління	Порти з політикою та практикою, які захищають деякі види тварин, місця проживання та маршрути міграції (наприклад, уздовж узбережжя Каліфорнії судам пропонуються щорічні стимули для зниження швидкості в портах і навколо портів, щоб уникнути фатальних зіткнень з китами та зменшити шумове забруднення)
4. Ланцюжки поставок	Порти або пов'язані з ними компанії, що використовують екологічно чисті ланцюжки поставок для відновлюваних джерел енергії та управління (Порт Роттердама)
5. Стимулювання викидів	Порти, які пропонують нижчі збори або інші стимули для залучення суден із хорошим рейтингом викидів («Зелена схема Темзи» - проект Управління лондонського порту (PLA), розроблений у співпраці з операторами суден («Зелений порт 2020»)

Рис. 2. Основні напрями та зміст передової практики в галузі соціальної та екологічної стійкості в портовому секторі

Враховуючи важливість знання та застосування передового досвіду, необхідно проаналізувати поточні ініціативи щодо декарбонізації морських портів.

Останнім часом було розроблено та впроваджено низку проектів інтелектуальних енергетичних технологій з метою максимізувати використання відновлюваних джерел енергії та скоротити викиди вуглецю.

Декілька проектів були спрямовані на розробку та реалізацію правил для впровадження стійких стратегій портової діяльності.

Одним із найбільших проектів із цифрової трансформації морських портів є проект Стокгольмського Королівського морського порту. Його метою є впровадження та розвиток безпального морського портового району з бюджетом близько 2,2 млрд євро. Ця ініціатива також включає розвиток найбільшої міської території у Швеції, будівництво понад 12 тис. нових будинків та створення понад 35 тис. робочих місць.

Green EFFORTS «Зелені та ефективні операції на терміналах та в портах» – це дослідницький проєкт, який фінансується спільно з Європейською комісією та спрямований на зниження споживання енергії та використання екологічно чистої енергії в портах. Цей проєкт надає інструменти стратегічного планування для портів та терміналів щодо скорочення викидів вуглецю та забезпечення більш інтелектуального управління енергоспоживанням у морських портах [9].

Проєкт APICE фінансується європейською програмою та спрямований на створення підходу до пом'якшення наслідків забруднення повітря та сталого розвитку портової діяльності, заснованої на політиці просторового планування на місцевому рівні, що включає територію навколо морських портів. Цей проєкт спрямований на те, щоб допомогти інтегрувати генеральний план порту та пов'язані з ним інвестиції у морські порти [10].

Велика група проектів вирішувала різні завдання сталого розвитку щодо життєвого циклу морських портів. Всі вони включали різні набори змінних та завдань щодо зниження енергоспоживання, скорочення викидів вуглецю та використання відновлюваних джерел енергії.

Порт Роттердама завдяки своєму масштабу, місцезнаходженням, чудовій інфраструктурі, прогресивним технологіям стає лідером у процесі декарбонізації. Вупертальський інститут клімату, навколишнього середовища та енергетики (Німеччина) сформулював три можливі шляхи декарбонізації для порту Роттердам [2].

Шляхи охоплюють різні рівні поставлених завдань та різні технології. Жоден шлях не є єдиним можливим. Кінцевий результат, ймовірно, формуватиметься їх комбінацією.

Стратегія портового управління Валенсії (PAV) щодо досягнення нульових викидів до 2030 року обумовлена чітким зобов'язанням порту приєднатися до Європейської зеленої угоди щодо необхідності скорочення викидів парникових газів від сектору морського транспорту.

До основних цілей Стратегії відносяться [7]:

– сприяння обезуглероженню іспанської портової системи, у тому числі завдяки включенню економіки замкнутого циклу до проектів будівництва портів та портових операцій;

- сприяння цифровій трансформації іспанської портової системи.
- У свою чергу, декарбонізація та цифрова трансформація порту вплине на:
 - зайнятість, знання та дослідження, що стимулюють зростаючий попит на робочі місця в секторі логістики та дистрибуції;
 - територіальну згуртованість за допомогою проектів, які сприятимуть інтеграції порту з транспортними мережами, включаючи залізничну мережу;
 - соціальну інтеграцію у вигляді дій, вкладених у підвищення промислової безпеки та охорону праці порту;
 - регіональне управління та ефективність адміністрації, що дозволяють обмінюватися інформацією у режимі реального часу з усіма учасниками портової діяльності.

5. **Декларація про декарбонізацію та стійкість річкових та морських портів у Дунайському регіоні.** Секретаріат Дунайської комісії у березні 2022 року запропонував проєкт «Декларації про декарбонізацію та стійкість річкових та морських портів у Дунайському регіоні», в якій буде документально оформлено прагнення дунайських портів розробляти стратегії, плани дій та проєкти щодо скорочення викидів парникових газів на 55 % до 20 та досягненню нетто-нульових викидів парникових газів до 2050 року [13].

Обґрунтування цієї ініціативи базується на таких положеннях:

- річкові та морські порти Дунайського регіону є важливими логістичними та транспортними вузлами в ланцюжках поставок і роблять істотний внесок у регіональний економічний розвиток як промислові вузли;
- порти мають значний невикористаний потенціал, щоб стати центрами виробництва та розподілу екологічно чистої енергії, а також розвитку економіки замкнутого циклу;
- у «Зеленій угоді» ЄС та Стратегії сталої та інтелектуальної мобільності наголошується на необхідності збільшення частки внутрішнього водного транспорту (ВВТ) на 25 % до 2030 р. та на 50 % до 2050 р. і визнається, що ВВТ разом із залізничним транспортом відіграє центральну роль у декарбонізації європейського транспорту;
- портова влада, адміністрація портів, оператори портів та інші портові підприємства повинні вжити конкретних заходів щодо скорочення викидів парникових газів та забезпечити стійкість розвитку та роботи портів;
- існує гостра потреба в інтенсивній співпраці та координації між портовими суб'єктами в цьому порту, між портами однієї країни та різних країн, а також між економічними секторами та на транснаціональному рівні.

При розробці цієї ініціативи було враховано такі рамкові умови:

- порти Дунайського регіону мають різні організаційні, фінансові та управлінські умови;
- портова влада/адміністрація має обмежені можливості прийняття екологічних рішень використання порту (операторів терміналів, транспортних компаній тощо);
- порти також можуть бути важливим партнером довкілля та регіонів з більш високим рівнем стійкості;
- влада/адміністрація порту повинна відігравати активну роль в озелененні всієї території порту.

Основні цілі Декларації про декарбонізацію та стійкість річкових та морських портів у Дунайському регіоні відображено на рис. 3.

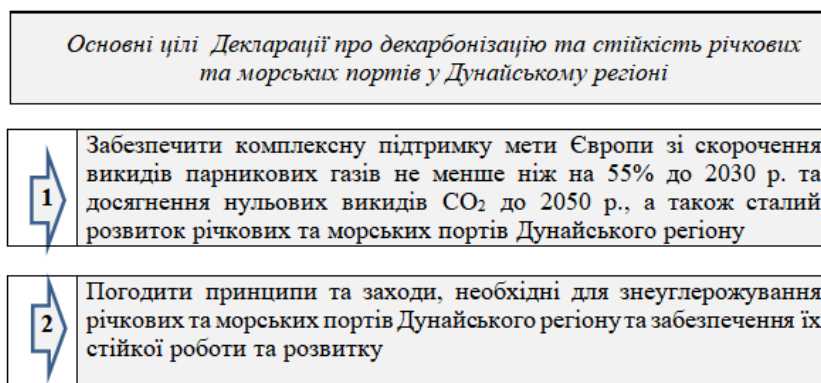


Рис. 3. Цілі Декларації про декарбонізацію та стійкість річкових та морських портів у Дунайському регіоні

Заходи щодо здійснення Декларації включають такі дії:

- виявлення, оцінку та моніторинг впливу діяльності порту на довкілля (повітря, якість води, відходи, шум, пил, відкладення);
- розробку та впровадження системи екологічного та сталого управління (ESMS);
- участь у розробці стратегій, планів дій та проектів реалізації, спрямованих на скорочення викидів парникових газів та досягнення цілей сталого розвитку;
- сприяння впровадженню інфраструктури альтернативних та відновлюваних видів палива;
- підтримку міського та внутрішнього водного транспорту на короткі відстані (водні автобуси, пороми, міська логістика тощо), де це можливо;
- використання можливостей, що виникають в результаті цифровізації управління та операцій портів, для підвищення ефективності та підтримки їхнього сталого розвитку.

6. Нові можливості для портів України внаслідок їхньої декарбонізації. Сучасні дослідження показують, що крім планування декарбонізації операцій у межах своїх кордонів, порти можуть розширювати свої пропозиції послуг у нових галузях, враховуючи зміни на системному рівні, які принесе декарбонізація.

У найближчі десятиліття промисловість, транспорт та опалення перейдуть від прямого використання викопного палива до водню та електрифікації. Порти – з об'єктами для імпорту ЗПГ, зв'язками з офшорними вітровими електростанціями та власним попитом на низьковуглецеве паливо – можуть стати природним місцем для виробництва, імпорту/експорту та зберігання водню.

У міру розвитку технології уловлювання та зберігання вуглецю також можуть з'явитися можливості для нових або адаптованих портових споруд, що обробляють зріджений вуглець. У міру зміни типів товарів, що продаються – зокрема, відмови від імпорту рідких та сипких матеріалів – можна вивчити можливості перепрофілювання існуючої інфраструктури та землекористування.

За наявності правильних стимулів каботажне судноплавство може також виступати як альтернатива великовантажним автомобілям з низьким рівнем викидів вуглецю.

Ці зміни відкриють перед портами нові можливості для співпраці з місцевою промисловістю, підприємствами та громадськими групами.

Наприклад, порт Осло зв'язався з місцевим заводом з переробки відходів в енергію, щоб використовувати їх відходи біогазу та надлишкове тепло.

Копенгагенський порт Мальме працює з місцевим муніципалітетом та комунальною компанією над створенням накопичувача енергії, який також може використовуватись містом.

Механізми забезпечення зеленого переходу ще розробляються. Важливими є питання зниження витрат та забезпечення справедливих соціальних результатів. При забезпеченні гнучкості планування інфраструктури та пошуку нових можливостей у системах з нульовими викидами порти можуть отримати конкурентну перевагу та підготувати свої організації до майбутнього.

В даний час у деяких портах розроблено так звані «дорожні карти нульового нетто – транспорту». Вони повинні допомогти реалізувати переваги, які може принести декарбонізація на системному рівні, а також сприяти скороченню викидів безпосередньо в портах та зонах їх впливу (рис. 4).

Етапи		Зміст розробок
1	Викиди та картування впливу	<ul style="list-style-type: none"> • на які викиди впливає порт • яка величина у кожній області
2	Огляд політики та розробка сценаріїв	<ul style="list-style-type: none"> • який політичний ландшафт • які різні шляхи до чистого нуля
3	Зміна системного рівня та динаміка ринку	<ul style="list-style-type: none"> • які ширші зміни може принести net-zero і як це може вплинути на порт
4	Втручання	<ul style="list-style-type: none"> • які зміни можуть скоротити викиди, наскільки легко їх впровадити чи вплинути на них • наскільки вони ефективні
5	Залучення та розстановка пріоритетів	<ul style="list-style-type: none"> • які дії порт, а також інші діючі особи та зацікавлені сторони вважають пріоритетними
6	Висновок	<ul style="list-style-type: none"> • як виглядає перша дорожня карта • як вона може реагувати на зміни • які перші дії

Рис. 4. Основні етапи «дорожньої карти для портів із нульовими викидами»

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, завдяки якій відомство підвищить технологічні можливості берегового електропостачання суден. Інші знайшли відображення у Білій книзі (White Paper) пріоритетів у морській галузі, яку підготував комітет з логістики Європейської бізнес-асоціації.

Визначення таких пріоритетів та робота щодо їх реалізації саме зараз дуже важлива, оскільки Україна, як і ЄС, проходить етап значних змін, але пріоритети довгострокових проєктів мають сприяти розвитку морських портів.

В Стратегії розвитку морських портів України на період до 2038 року [14] вказано, що за оцінкою Всесвітнього економічного форуму щодо якості послуг у морських портах у 2018 році Україна отримала 3,8 бала із 7 можливих (77 місце із 140 країн).

Одним із основних напрямків зміни цього положення Стратегія бачить у необхідності «повільного оновлення основних фондів на державних підприємствах портової галузі, невідповідність їх технічного рівня сучасним вимогам щодо надання послуг із здійснення операцій з обслуговування вантажів, суден, рухомого складу тощо».

Для розв’язання проблем необхідно виконати такі завдання:

- 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.

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. Морські порти вважаються одним з основних двигунів світової економіки та ключовим елементом транспортної, судноплавної, туристичної та рибальської галузей.

Однак активізація діяльності в морських портах вплинула на навколишнє середовище, включаючи високі викиди вуглецю, шум у результаті діяльності в морських портах, високе споживання енергії та серйозний вплив на здоров’я населення прибережних міст поблизу морських портів.

Велика кількість опублікованих досліджень зробила значний внесок у перетворення та просування концепції «зелених» та «розумних» морських портів у різних країнах.

Ключовими факторами, що сприяють декарбонізації морських портів, є:

- використання відновлюваних ресурсів,
- оптимізація витрат,

- впровадження інтелектуальних технологій,
- встановлення правил та положень щодо екологізації морських портів.

На довкілля, на думку фахівців, прямо чи опосередковано впливають три основні чинники:

- споживання викопного палива,
- високе енергоспоживання енергосистем,
- відсутність професійного управління ресурсами в морських портах.

Важливу роль відіграють інвестиції в сучасні технології, що скорочують викиди вуглецю, такі як системи відновлюваної енергії, інтелектуальні пристрої обліку та інші сучасні технології.

Щоб переконати інвесторів у доцільності інвестування в сучасні морські порти, мають бути передбачені відповідні стимули та ініціативи. Це може бути фінансовий зиск, уникнення штрафів за екологічним законодавством, стійкість порту та глобального клімату.

У рамках плану забезпечення стійкості морських портів необхідно забезпечити повне знеуглерожування життєвого циклу. Це вплине на всю систему і сприятиме комплексній ефективності морських портів і підвищенню рівня екологізації, стійкості та конкурентоспроможності між морськими портами.

Впровадження керівних принципів практики «зелених морських портів», використання передового досвіду в цій галузі дозволить портам України швидше перейти у своїй практиці на найкращі світові стандарти.

ЛІТЕРАТУРА

1. Резолюція Генеральної асамблеї ООН №45/212. URL: <https://undocs.org/ru/A/RES/45/212>.
2. Clemens Schneider Stefan Lechtenböhmer, Sascha Samadi. Risks and opportunities associated with decarbonising Rotterdam's industrial cluster. *Environmental Innovation and Societal Transitions*. 2020. Vol. 35. Pp. 414–428. URL: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100727>.
3. Ateyah Alzahrani, Ioan Petri, Yacine Rezgüi. Decarbonisation of seaports: A review and directions for future research. *Energy Strategy Reviews*. 2021. Vol. 38. P. 1–18. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eist.2019.05.004>.
4. Ten ways to decarbonize ports. URL: <https://piernext.portdebarcelona.cat/en/environment/ten-ways-to-decarbonize-ports/>.
5. World ports sustainability report 2020. URL: <https://sustainableworldports.org/wp-content/uploads/WORLD-PORTS-SUSTAINABILITY-REPORT-2020-FIN.pdf>.
6. Smart ports: the transformation of the port industry. URL: <https://nexu-sintegra.io/smart-ports-transformation-port-industry/>.
7. Ports and Harbours Bureau: 2.4 Carbon Neutral Port (CNP) Initiative. URL: https://www.mlit.go.jp/en/kowan/kowan_fr4_000011.html.
8. Ports: net zero, systems thinking and big opportunities – Arup. URL: <https://www.arup.com/perspectives/ports-net-zero-systems-thinking-and-big-opportunities>.
9. Green EFFORTS. URL: <https://greenefforts.eu/>.

10. APICE – Common Mediterranean strategy and local practical Actions for the mitigation of Port, Industries and Cities Emissions. URL: <http://www.apice-project.eu>.
11. Priorities of european ports for 2019 – 2024. URL: <https://www.espo.be/media/Memorandum%20ESPO%20FINAL%20Digital%20version.pdf>.
12. The second Expert Meeting for the Development of Ports and Port Operations (EM Ports). URL: <https://www.danubecommission.org/dc/en/2022/03/19>.
13. Стратегія розвитку морських портів України на період до 2038 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/548-2013-%D1%80>.
14. Decarbonizing Ports: The Promise of As-a-Service Models for Zero Emission Trucks. URL: <https://www.engeimpact.com/insights/accelerate-port-decarbonization>.

REFERENCES

1. Resolution of the UN General Assembly No45/212 [Rezoliutsiia Heneralnoi asamblei OON]. URL: <https://undocs.org/ru/A/RES/45/212> [in Ukrainian].
2. Clemens Schneider Stefan Lechtenböhmer, Sascha Samadi (2020). Risks and opportunities associated with decarbonising Rotterdam’s industrial cluster. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 35, 414–428. URL: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100727> [in English].
3. Ateyah Alzahrani, Ioan Petri, Yacine Rezgui (2021). Decarbonisation of seaports: A review and directions for future research. *Energy Strategy Reviews*, 38, 1–18. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eist.2019.05.004> [in English].
4. Ten ways to decarbonize ports. URL: <https://piernext.portdebarcelona.cat/en/environment/ten-ways-to-decarbonize-ports/> [in English].
5. World ports sustainability report 2020. URL: <https://sustainableworldports.org/wp-content/uploads/WORLD-PORTS-SUSTAINABILITY-REPORT-2020-FIN.pdf> [in English].
6. Smart ports: the transformation of the port industry. URL: <https://nexusintegra.io/smart-ports-transformation-port-industry/> [in English].
7. Ports and Harbours Bureau: 2.4 Carbon Neutral Port (CNP) Initiative. URL: https://www.mlit.go.jp/en/kowan/kowan_fr4_000011.html [in English].
8. Ports: net zero, systems thinking and big opportunities – Arup. URL: <https://www.arup.com/perspectives/ports-net-zero-systems-thinking-and-big-opportunities> [in English].
9. Green EFFORTS. URL: <https://greenefforts.eu/> [in English].
10. APICE – Common Mediterranean strategy and local practical Actions for the mitigation of Port, Industries and Cities Emissions. URL: <http://www.apice-project.eu>.
11. Priorities of european ports for 2019–2024. URL: <https://www.espo.be/media/Memorandum%20ESPO%20FINAL%20Digital%20version.pdf> [in English].

12. The second Expert Meeting for the Development of Ports and Port Operations (EM Ports). URL: <https://www.danubecommission.org/dc/en/2022/03/19> [in English].
13. Strategy for the development of seaports of Ukraine for the period until 2038 [Stratehiia rozvytku morskyykh portiv Ukrainy na period do 2038 roku]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/548-2013-%D1%80> [in Ukrainian].
14. Decarbonizing Ports: The Promise of As-a-Service Models for Zero Emission Trucks. URL: <https://www.engeimpact.com/insights/accelerate-port-decarbonization> [in English].

Наукове видання

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

Випуск 3(14), 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. 18,03.
Замов. № 1022/429. Наклад 200 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.

Scientific publication

TRANSPORT DEVELOPMENT

Scientific journal

Issue 3(14), 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 18,03.
Order No 1022/429. Edition of 200 copies.

Publishing House “Helvetica”
65101, Ukraine, Odessa, 6/1 Inglizi St.
Phone: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Certificate of publishing entity
ДК № 7623 as of 22.06.2022