

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

ВИПУСК 1(12), 2022

Заснований у жовтні 2016 року



Видавничий дім
«Гельветика»
2022

ОДЕСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ
НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 1(12)
2022

Заснований у жовтні 2016 року

Виходить 4 рази на рік

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

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

Засновник:

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

Редакційна колегія:

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

Члени редакційної колегії:

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

Малекі 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 № 9 від 23 лютого 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 1(12), 2022

Founded in October 2016



Publishing House
"Helvetica"
2022

ODESSA
NATIONAL MARITIME UNIVERSITY
TRANSPORT DEVELOPMENT
SCIENTIFIC JOURNAL

№ 1(12)
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 9 dated February 23, 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

Стратегічна взаємодія у просторовій дуополії
в умовах транспортної монополії.....9

М.Уа. Postan, L.S. Filina-Dawidowicz

Model for optimal planning of marketing activity of plant,
production and transportation of perishable products.....22

РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

**R.A. Varbanets, O.V. Fomin, V.G. Klymenko,
D.S. Minchev, V.P. Malchevsky, V.I. Zalozh**

Vibroacoustic diagnostics of marine diesel engine turbocharger..... 30

Г.В. Коновалова, О.В. Щедролосєв, С.В. Терлич

Розрахунок параметрів остійності
однорусного контейнерного хаусботу..... 45

О.М. Мельник, К.С. Корякін, О.В. Логінов

Супутникові компаси у системі забезпечення
безпеки навігації суден..... 54

В.П. Савчук, Є.В. Білоусов, Д.О. Зінченко, М.О. Бойко

Система моніторингу шатунних підшипників колінчастих валів
суднових двигунів внутрішнього згорання..... 64

Д.О. Шалапко

Покращення експлуатаційних показників суднової енергетичної
установки танкера проєкту RST27 за рахунок використання
водневих присадок.....75

О.М. Шумило

Визначення оптимальних розмірів подовження
пасажирських суден у процесі їх модернізації..... 85

Ю.К. Яглицький

Комплексне дослідження сучасних тенденцій
«зеленого» судноплавства..... 105

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

В.В. Берестенко, С.П. Онищенко

Імовірнісні характеристики мультимодальної доставки.....118

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ
№ 1(12), 2022

М.В. Босий, В.В. Клименко Транспортування природного газу в газогідратному стані.....	129
О.К. Gryshchuk, A.V. Petryk, Y.V. Yerko Determination of functional characteristics of customs and logistics infrastructure in transport systems of international direction.....	143
М.М. Жук, Г.В. Півторак, І.І. Гіць Застосування нейромережевого моделювання для прогнозування тривалості перебування транспортного засобу на зупинці громадського транспорту.....	156
В.В. Федонюк, В.В. Іванців, М.А. Федонюк Вплив карантинних обмежень, викликаних епідемією COVID-19, на інтенсивність транспортного руху та екологічний стан у м. Луцьку.....	168

C O N T E N T S

ECONOMY

- S.V. Melnikov**
Strategic interaction in a spatial duopoly under transport monopoly..... 9
- M.Ya. Postan, L.S. Filina-Dawidowicz**
Model for optimal planning of marketing activity of plant,
production and transportation of perishable products.....22

RIVER AND SEA TRANSPORT

- R.A. Varbanets, O.V. Fomin, V.G. Klymenko,
D.S. Minchev, V.P. Malchevsky, V.I. Zalozh**
Vibroacoustic diagnostics of marine diesel engine turbocharger..... 30
- H.V. Konovalova, O.V. Shchedrolosiev, S.V. Terlych**
The calculation of stability parameters
of a low-tier container houseboat.....45
- O.M. Melnyk, K.S. Koriakin, O.V. Lohinov**
Satellite compasses in the safety control system of ship navigation..... 54
- V.P. Savchuk, E.V. Belousov, D.O. Zinchenko, M.O. Boyko**
The monitoring system for connecting-rod bearings
of the marine internal combustion engine.....64
- D.O. Shalapko**
Improving the tanker project RST27 ship power plant
performance by hydrogen additives usage.....75
- O.M. Shumylo**
Determination of optimal sizes of extension
of passenger vessels in the their modernization..... 85
- Yu.K. Yahlytskyi**
Comprehensive study of current trends in “green” shipping.....105

TRANSPORT TECHNOLOGIES (BY TYPE)

- V.V. Berestenko, S.P. Onyshchenko**
Probabilistic characteristics of multimodal shipping.....118
- M.V. Bosyi, V.V. Klymenko**
Transportation of natural gas in the gas-hydrate state.....129
- O.K. Gryshchuk, A.V. Petryk, Y.V. Yerko**
Determination of functional characteristics of customs and logistics
infrastructure in transport systems of international direction.....143

M.M. Zhuk, H.V. Pivtorak, I.I. Hits Application of neural network modeling to forecasting the vehicle stay duration at the public transport stop.....	156
V.V. Fedoniuk, V.V. Ivantsiv, M.A. Fedoniuk The influence of quarantine restrictions due to the COVID-19 epidemic on traffic intensity and ecological condition in Lutsk.....	168

ЕКОНОМІКА

УДК 519.865:338.518

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.1-12.01>

СТРАТЕГІЧНА ВЗАЄМОДІЯ У ПРОСТОРОВІЙ ДУОПОЛІЇ В УМОВАХ ТРАНСПОРТНОЇ МОНОПОЛІЇ

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. Уже протягом багатьох років економісти обговорюють переваги цінової та кількісної конкуренції на ринку олігополії. Нині можна стверджувати, що немає такого виду конкуренції, який мав би абсолютну перевагу. Залежно від характеристик ринків, що моделюються, оптимальним буде той чи інший вид конкуренції. **Метою** цієї роботи є аналіз стратегічної взаємодії у моделі просторової дуополії [8] в умовах продуктової диференціації, асиметрії розмірів ринків та транспортної монополії. З метою максимізації прибутку фірми спочатку вибирають місце розташування, а потім вид конкуренції – за Курно або Бертраном. **Результати.** Визначено, що транспортна монополія дискримінує фірми за їх взаємним розташуванням. Доведено, що у разі агломерації фірм транспортний тариф інваріантний щодо асиметрії ринків, продуктової диференціації та виду конкуренції. У разі дисперсії фірм транспортний тариф інваріантний тільки щодо асиметрії ринків. Знайдено, що оптимальний для фірм вид конкуренції визначається видом продуктової диференціації, а споживчі надлишки та суспільний добробут завжди вищі у разі конкуренції за Бертраном. У разі взаємозамінності фірми вибирають кількісну конкуренцію, у разі взаємодоповнюваності – цінову конкуренцію.

Висновки. У роботі визначено відповідні стани рівноваги та проведено порівняльний аналіз місць розташування, прибутків, споживчих надлишків і суспільного добробуту. Доведено, що у разі досить високого рівня асиметрії агломерація на великому ринку є єдиною рівновагою Неша у чистих стратегіях, незалежно від виду конкуренції.

Ключові слова: просторова дуополія, асиметрія ринків, кількісна та цінова конкуренція, транспортна монополія.

STRATEGIC INTERACTION IN A SPATIAL DUOPOLY
UNDER TRANSPORT MONOPOLY

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. For many years economists have been discussing the benefits of price and quantity competition in the oligopoly market. To date, it can be argued that there is no type of competition that has an absolute advantage. Depending on the characteristics of the markets being modeled, one or another type of competition will be optimal. **The purpose** of this paper is to analyze the spatial duopoly model [8] under conditions of product differentiation, asymmetric markets and transport monopoly. In order to maximize profits, firms first select a location and then the type of competition – Cournot or Bertrand. **Results.** It is obtained that the transport monopoly discriminates against firms by their mutual location. It is proved that in the case of agglomeration of firms the transport tariff is invariant with respect to market asymmetry, product differentiation and type of competition. With the dispersion of firms, the transport tariff is invariant only with respect to the asymmetry of markets. It was found that the optimal type of competition for firms is determined by the type of product differentiation, and consumer surpluses and social welfare are always higher in Bertrand competition. With substitute goods firms choose quantitative competition, with complementary goods they choose price competition. **Conclusions.** The paper identifies the appropriate states of equilibrium and comparative analysis of locations, profits, consumer surpluses and social welfare. It is proved that with a high enough level of asymmetry, agglomeration in a large market is the only Nash equilibrium in pure strategies, regardless of the type of competition.

Key words: spatial duopoly, markets asymmetry, quantitative and price competition, transport monopoly.

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

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

Дослідження впливу виду конкуренції на процеси агломерації і дисперсії фірм у просторових моделях проведено у роботах [2–6]. Визначено, що у разі цінової конкуренції фірми будуть прагнути до максимальної дисперсії для подолання парадоксу Бертрана. У разі кількісної конкуренції розташування фірм істотно

залежить від транспортних витрат. Низькі транспортні витрати стимулюють фірми агломеруватись і продавати на всіх ринках. У разі високих транспортних витрат фірмам вигідно монополізувати найближчий ринок і мінімізувати поставки на сусідні ринки.

Подальші дослідження пов'язані з урахуванням у просторових моделях продуктової диференціації [7] та асиметрії розмірів ринків [8]. У [7] показано, що взаємозамінність (взаємодоповнюваність) продуктів підсилює прагнення фірм до дисперсії (агломерації). Урахування асиметрії розмірів ринків у [8] призвело до зворотних від [1] результатів. Визначено, що за досить високої асиметрії ринків фірмам може бути вигідна цінова, а споживачам – кількісна конкуренція.

Відзначимо, що в [8] просторова дуополія аналізується у разі незмінного транспортного тарифу. Проте у загальному випадку транспортні тарифи можуть відрізнятися за напрямками через асиметрію розмірів ринків [9] або цінову дискримінацію транспортної компанії-монополіста [10–12].

Метою цієї роботи є аналіз стратегічної взаємодії в просторовій дуополії [8] в умовах транспортної монополії.

Модель

Два ринки розташовані на кінцях лінії одиничної довжини. Між ринками існує асиметрія – розмір ринку з лівого боку (L) перевищує розмір ринку з правого боку (S). На лінії конкурують дві фірми з індексами i та j , $i, j = 1, 2, i \neq j$. На обох ринках фірми продають диференційовану продукцію, арбітраж між споживачами виключений. Відстань i -ї фірми до L -ринку дорівнює x_i . Обмеження на взаємне розташування фірм відсутні. Кожна фірма несе транспортні витрати на постачання одиниці продукції на одиницю відстані. Доставку продуктів здійснює транспортна монополія. Мета всіх учасників – максимізація свого прибутку.

Для побудови функцій попиту і споживчих надлишків скористаємося квадратичною функцією корисності [1]:

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

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

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

Цільові функції споживачів на ринках:

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

де p_i, p_j – ціни на продукцію фірм.

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

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

Підставляючи функції попиту (2) в цільові функції (1), отримуємо формули надлишків споживачів:

$$CS^L = U^L - p_i^L q_i^L - p_j^L q_j^L = \frac{(q_i^L)^2 + 2\varphi q_i^L q_j^L + (q_j^L)^2}{2\gamma},$$

$$CS^S = U^S - p_i^S q_i^S - p_j^S q_j^S = \frac{(q_i^S)^2 + 2\varphi q_i^S q_j^S + (q_j^S)^2}{2}.$$
(3)

Прийнемо, 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 вибирають своє місце розташування. На другому етапі, з огляду на рішення про місце розташування, фірми одночасно вибирають свої обсяги пропозиції (ціни) у разі конкуренції за Курно (Бертраном). Рівновага моделі знаходиться за допомогою методу зворотної індукції.

Конкуренція за Курно

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

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

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

Вирішуючи системи рівнянь (4), знаходимо рівноважні обсяги пропозицій:

$$q_i^L = \gamma \frac{2(1 - tx_i) - \varphi(1 - tx_j)}{4 - \varphi^2}, \quad q_i^S = \frac{2(1 - t(1 - x_i)) - \varphi(1 - t(1 - x_j))}{4 - \varphi^2}.$$
(5)

Умови покриття ринків:

$$q_i^L > 0 \Leftrightarrow t < t_{\text{cov}}^L = \frac{2 - \varphi}{2x_i - \varphi x_j}, \quad q_i^S > 0 \Leftrightarrow t < t_{\text{cov}}^S = \frac{2 - \varphi}{2(1 - x_i) - \varphi(1 - x_j)}.$$
(6)

Прибуток:

$$F_i^C = (q_i^L)^2 / \gamma + (q_i^S)^2.$$
(7)

На першому етапі фірми оптимізують своє місце розташування у разі такого місця розташування конкурента. З умови другого порядку (8) випливає, що функція прибутку (7) строго опукла вниз за місцем розташування:

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

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

Знаючи рівноважні розташування фірм, ми можемо завершити аналіз умов покриття ринків (6)

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

Прибуток транспортної монополії:

$$F^T = t(x_i q_i^L + x_j q_j^L + (1-x_i)q_i^S + (1-x_j)q_j^S) \rightarrow \max_t. \quad (9)$$

Вирази (5) є функціями попиту фірм на транспортні послуги. Підставляємо вирази (5) у функцію прибутку (9), і з умови першого порядку знаходимо оптимальний транспортний тариф:

$$t^C = \frac{(2-\varphi)(2+(x_i+x_j)(\gamma-1))}{4((\gamma+1)(x_i^2-\varphi x_i x_j+x_j^2)+(2-\varphi)(1-x_i-x_j))},$$

умова другого порядку:

$$\frac{\partial^2 F^T}{\partial t^2} = -\frac{4((\gamma+1)(x_i^2-\varphi x_i x_j+x_j^2)+(2-\varphi)(1-x_i-x_j))}{4-\varphi^2} < 0.$$

У разі кутових місць розташування фірм тариф інваріантний щодо асиметрії ринків:

$$t^C(0,1) = t^C(1,0) = \frac{2-\varphi}{4}, \quad t^C(0,0) = t^C(1,1) = \frac{1}{2}. \quad (10)$$

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

Таблиця 1

Матриця гри на першому етапі

$i \backslash j$	<i>L</i> -ринок	<i>S</i> -ринок
<i>L</i> -ринок	$F_i^C(0,0), F_j^C(0,0)$	$F_i^C(0,1), F_j^C(0,1)$
<i>S</i> -ринок	$F_i^C(1,0), F_j^C(1,0)$	$F_i^C(1,1), F_j^C(1,1)$

Через симетричність фірм виконуються такі співвідношення:

$$F_i^C(0,0) = F_j^C(0,0), \quad F_i^C(1,1) = F_j^C(1,1),$$

$$F_i^C(0,1) = F_j^C(1,0), \quad F_i^C(1,0) = F_j^C(0,1).$$

Прийmemo, що фірмам відомі монопольні транспортні тарифи (10). У цьому випадку матриця гри на першому етапі виглядає таким чином (табл. 2).

Таблиця 2

Платіжна матриця гри на першому етапі

$i \backslash j$	<i>L</i> -ринок	<i>S</i> -ринок
<i>L</i> -ринок	$\frac{16\gamma+4}{16(2+\varphi)^2}, \frac{16\gamma+4}{16(2+\varphi)^2}$	$\frac{\gamma(4+\varphi)^2+4}{16(2+\varphi)^2}, \frac{4\gamma+(4+\varphi)^2}{16(2+\varphi)^2}$
<i>S</i> -ринок	$\frac{4\gamma+(4+\varphi)^2}{16(2+\varphi)^2}, \frac{\gamma(4+\varphi)^2+4}{16(2+\varphi)^2}$	$\frac{4\gamma+16}{16(2+\varphi)^2}, \frac{4\gamma+16}{16(2+\varphi)^2}$

Для пошуку рівноважних ситуацій порівняємо прибутки фірм за різних видів продуктової диференціації. Порівняльний аналіз прибутків i -ї фірми у разі вибору місць в умовах взаємозамінності:

$$\begin{cases} F_i^C(0,1) > F_i^C(1,0) \geq F_i^C(0,0) > F_i^C(1,1), & 1 < \gamma \leq \gamma_1, \\ F_i^C(0,1) > F_i^C(0,0) > F_i^C(1,0) > F_i^C(1,1), & \gamma > \gamma_1, \end{cases} \quad (11)$$

де $\gamma_1 = 1 + \frac{8\varphi + \varphi^2}{12}$.

З нерівностей (11) випливає, що оптимальним для i -ї фірми є варіант, коли вона розташовується на L -ринку, а конкурент на S -ринку. Асиметрія притягує фірми на L -ринок, а взаємозамінність відштовхує фірми одна від одної.

Рівноваги в грі залежать від рівня асиметрії ринків. При $\gamma \leq \gamma_1$ вплив взаємозамінності домінує над впливом асиметрії і i -ї фірмі навіть вигідніше окремо розташуватися на S -ринку, ніж агломеруватись на L -ринку. У цій ситуації в 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. При $\gamma > \gamma_1$ навпаки, вплив асиметрії домінує над впливом взаємозамінності. У цій ситуації агломерація на L -ринку є єдиною рівновагою Неша в чистих стратегіях, тому що фірми виберуть L -ринок за будь-якого рішення конкурента.

Динаміка прибутків i -ї фірми за різних місць розташування представлена на рис. 1, де $\varphi = 0,75$, $\gamma_1 = 1,55$.

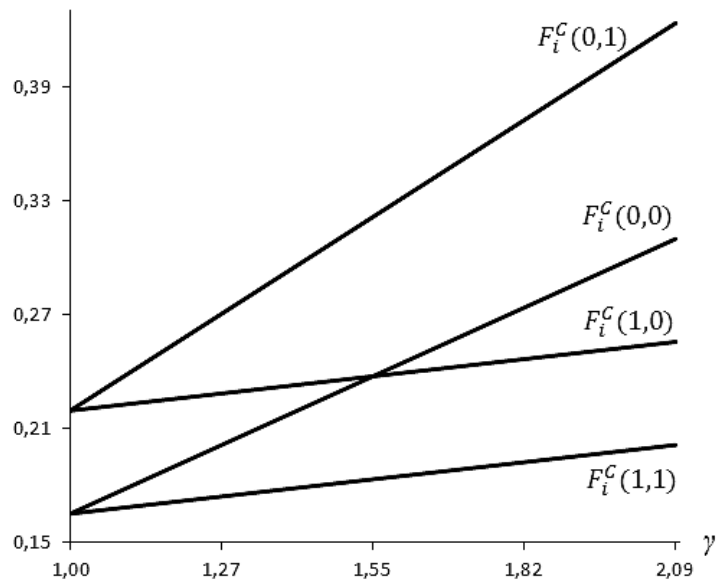


Рис. 1. Рівноважні прибутки i -ї фірми в умовах взаємозамінності за конкуренції Курно

Джерело: власна розробка

Порівняльний аналіз прибутків i -ї фірми у разі вибору місць в умовах взаємодоповнюваності:

$$\begin{cases} F_i^C(0,0) > F_i^C(1,1) \geq F_i^C(0,1) > F_i^C(1,0), & 1 < \gamma \leq \gamma_2, \\ F_i^C(0,0) > F_i^C(0,1) > F_i^C(1,1) > F_i^C(1,0), & \gamma > \gamma_2, \end{cases} \quad (12)$$

де $\gamma_2 = 1/\gamma_1$.

З нерівностей (12) випливає, що оптимальним для i -ї фірми є агломерація на L -ринку. Асиметрія притягує фірми на L -ринок, а взаємодоповнюваність притягує фірми одна до одної.

Рівноваги в грі залежать від рівня асиметрії ринків. При $\gamma \leq \gamma_2$ в грі виникають дві рівноваги Неша в чистих стратегіях, у яких фірми агломеруються. При цьому агломерація на L -ринку краща для обох фірм і є оптимальною за Парето. При $\gamma > \gamma_2$ агломерація на L -ринку є єдиною рівновагою Неша в чистих стратегіях, тому що фірми виберуть L -ринок за будь-якого рішення конкурента.

Динаміка прибутків i -ї фірми за різних місць розташування представлена на рис. 2, де $\varphi = -0,75$, $\gamma_2 = 1,83$.

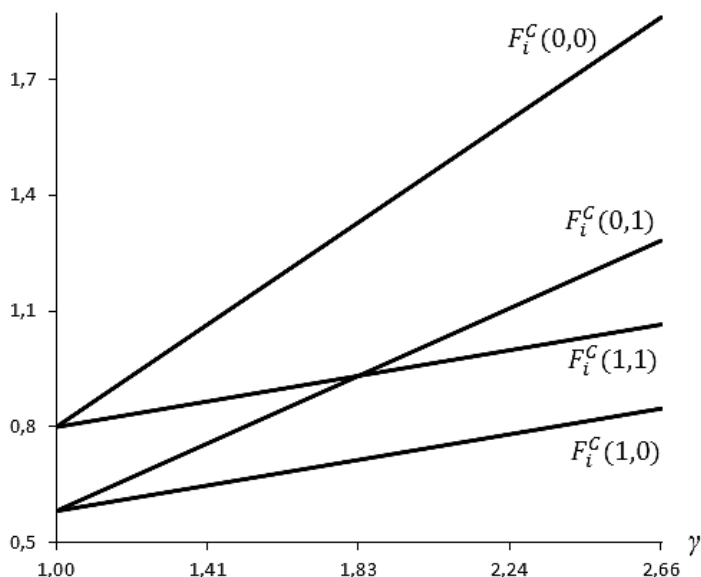


Рис. 2. Рівноважні прибутки i -ї фірми в умовах взаємодоповнюваності за конкуренції Курно

Джерело: власна розробка

Конкуренція за Берtrandом

З (1) виводимо функції попиту на кожному ринку:

$$q_i^L = \frac{\gamma}{1-\varphi^2} (1-\varphi - p_i^L + \varphi p_j^L), \quad q_i^S = \frac{1}{1-\varphi^2} (1-\varphi - p_i^S + \varphi p_j^S). \quad (13)$$

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

$$p_i^L = \frac{1-\varphi + \varphi p_j^L + t x_i}{2}, \quad p_i^S = \frac{1-\varphi + \varphi p_j^S + t(1-x_i)}{2}, \quad (14)$$

умови другого порядку:

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

Вирішуючи системи рівнянь (14), знаходимо рівноважні ціни:

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

Обсяги пропозицій:

$$q_i^L = \gamma \frac{(2 - \varphi^2)(1 - tx_i) - \varphi(1 - tx_j)}{(1 - \varphi^2)(4 - \varphi^2)}, \quad q_i^S = \frac{(2 - \varphi^2)(1 - t(1 - x_i)) - \varphi(1 - t(1 - x_j))}{(1 - \varphi^2)(4 - \varphi^2)}. \quad (15)$$

Умови покриття ринків:

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

$$q_i^S > 0 \Leftrightarrow t < t_{\text{cov}}^B = \frac{2 - \varphi - \varphi^2}{(2 - \varphi^2)(1 - x_i) - \varphi(1 - x_j)}. \quad (16)$$

Прибуток:

$$F_i^B = (1 - \varphi^2) \left((q_i^L)^2 / \gamma + (q_i^S)^2 \right). \quad (17)$$

На першому етапі фірми оптимізують своє місце розташування у разі такого місця розташування конкурента. З умови другого порядку (18) випливає, що функція прибутку (17) строго опукла вниз за місцем розташування:

$$\frac{\partial^2 F_i}{\partial x_i^2} = \frac{2t^2(\gamma + 1)(2 - \varphi^2)^2}{(1 - \varphi^2)(4 - \varphi^2)^2} > 0. \quad (18)$$

Таким чином, у стані рівноваги фірми будуть розташовуватися тільки на ринках, незалежно від рівня транспортних тарифів. З (16) отримуємо умову покриття ринків:

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

Вирази (15) є функціями попиту фірм на транспортні послуги. Підставляємо вирази (15) у функцію прибутку (9), і з умови першого порядку знаходимо оптимальний транспортний тариф:

$$t^B = \frac{(2 - \varphi - \varphi^2)(2 + (x_i + x_j)(\gamma - 1))}{2((\gamma + 1)((2 - \varphi^2)(x_i^2 + x_j^2) - 2\varphi x_i x_j) + 2(2 - \varphi - \varphi^2)(1 - x_i - x_j))}. \quad (19)$$

умова другого порядку:

$$\frac{\partial^2 F^T}{\partial t^2} = -\frac{2((\gamma + 1)((2 - \varphi^2)(x_i^2 + x_j^2) - 2\varphi x_i x_j) + 2(2 - \varphi - \varphi^2)(1 - x_i - x_j))}{(1 - \varphi^2)(4 - \varphi^2)} < 0.$$

У разі кутових місць розташування фірм тариф інваріантний щодо асиметрії ринків:

$$t^B(0,1) = t^B(1,0) = \frac{2-\varphi-\varphi^2}{2(2-\varphi^2)}, \quad t^B(0,0) = t^B(1,1) = \frac{1}{2}. \quad (20)$$

На першому етапі конкурентну взаємодію фірм можна описати у вигляді біматричної гри (табл. 1). Прийнемо, що фірмам відомі монополльні транспортні тарифи (20).

Для пошуку рівноважних ситуацій порівнюємо прибутки фірм за різних видів продуктової диференціації. Порівняльний аналіз прибутків i -ї фірми у разі вибору місць в умовах взаємозамінності:

$$\begin{cases} F_i^B(0,1) > F_i^B(1,0) \geq F_i^B(0,0) > F_i^B(1,1), & 1 < \gamma \leq \gamma_3, \\ F_i^B(0,1) > F_i^B(0,0) > F_i^B(1,0) > F_i^B(1,1), & \gamma > \gamma_3, \end{cases} \quad (21)$$

де $\gamma_3 = 1 + \frac{4\varphi(2-\varphi^2) + \varphi^2}{3(2-\varphi^2)^2}$.

З нерівностей (21) випливає, що оптимальним для i -ї фірми є варіант, коли вона розташовується на L -ринку, а конкурент на S -ринку. При $\gamma \leq \gamma_3$ вплив взаємозамінності домінує над впливом асиметрії і i -ї фірмі навіть вигідніше окремо розташуватися на S -ринку, ніж агломеруватись на L -ринку. У цій ситуації в 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. При $\gamma > \gamma_3$, навпаки, вплив асиметрії домінує над впливом взаємозамінності. У цій ситуації агломерація на L -ринку є єдиною рівновагою Неша в чистих стратегіях, тому що фірми виберуть L -ринок за будь-якого рішення конкурента.

Динаміка прибутків i -ї фірми за різних місць розташування представлена на рис. 3, де $\varphi = 0,75$, $\gamma_3 = 1,79$.

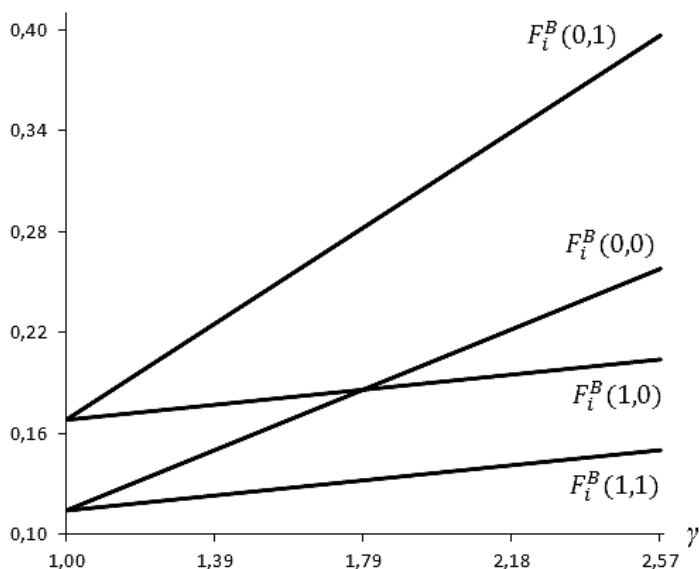


Рис. 3. Рівноважні прибутки i -ї фірми в умовах взаємозамінності за конкуренції Бертрана

Джерело: власна розробка

Порівняльний аналіз прибутків i -ї фірми у разі вибору місць в умовах взаємодоповнюваності:

$$\begin{cases} F_i^B(0,0) > F_i^B(1,1) \geq F_i^B(0,1) > F_i^B(1,0), & 1 < \gamma \leq \gamma_4, \\ F_i^B(0,0) > F_i^B(0,1) > F_i^B(1,1) > F_i^B(1,0), & \gamma > \gamma_4, \end{cases} \quad (22)$$

де $\gamma_4 = 1/\gamma_3$.

З нерівностей (22) випливає, що оптимальною стратегією для i -ї фірми є агломерація на L -ринку. При $\gamma \leq \gamma_4$ у грі виникають дві рівноваги Неша в чистих стратегіях, у яких фірми агломеруються. При цьому агломерація на L -ринку краща для обох фірм і є оптимальною за Парето. При $\gamma > \gamma_4$ агломерація на L -ринку є єдиною рівновагою Неша в чистих стратегіях, тому що фірми виберуть L -ринку за будь-якого рішення конкурента.

Динаміка прибутків i -ї фірми за різних місць розташування представлена на рис. 4, де $\varphi = -0,75$, $\gamma_4 = 2,53$.

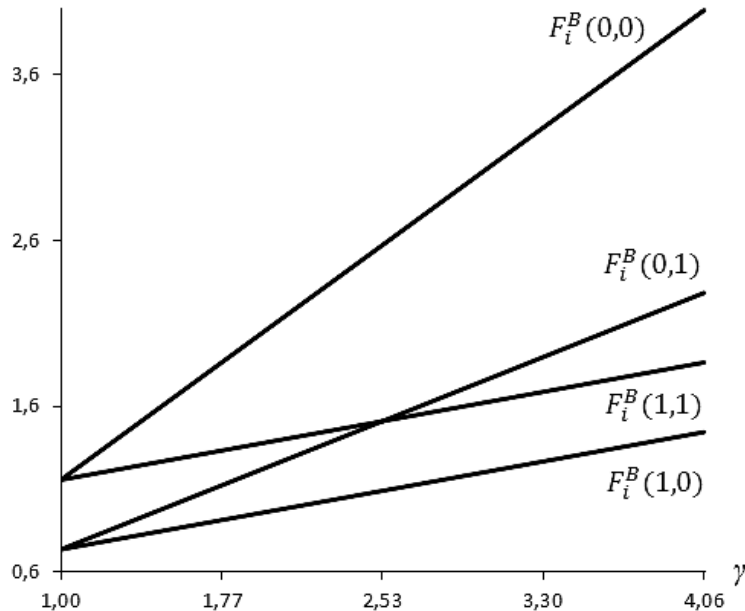


Рис. 4. Рівноважні прибутки i -ї фірми в умовах взаємодоповнюваності за конкуренції Бертрана

Джерело: власна розробка

Порівняльний аналіз рівноваг

У цьому розділі проводиться порівняльний аналіз прибутків, споживчих надлишків і суспільного добробуту за різних видів конкуренції. Розглянемо випадок, коли за високої асиметрії фірми агломеруються на L -ринку.

Порівняємо прибутки фірм:

$$F_i^C(0,0) - F_i^B(0,0) = \frac{\varphi^3(4\gamma + 1)}{2(1 + \varphi)(4 - \varphi^2)^2}.$$

Таким чином, оптимальний для фірм вид конкуренції визначається видом продуктової диференціації. У разі взаємозамінності фірми вибирають кількісну конкуренцію, у разі взаємодоповнюваності – цінову конкуренцію.

Порівняємо споживчі надлишки (3) у разі можливих станів рівноваги. Верхній індекс вказує на вид конкуренції, а нижній – на ринок.

$$CS_L^C(0, 0) - CS_L^B(0, 0) = \frac{\gamma\varphi^2(\varphi^2 - 2\varphi - 4)}{(1 + \varphi)(4 - \varphi^2)^2} < 0,$$
$$CS_S^C(0, 0) - CS_S^B(0, 0) = \frac{\varphi^2(\varphi^2 - 2\varphi - 4)}{4(1 + \varphi)(4 - \varphi^2)^2} < 0.$$

Таким чином, споживачам на обох ринках завжди вигідна цінова конкуренція, незалежно від продуктової диференціації.

Визначимо суспільний добробут як суму надлишків споживачів і фірм. У такій моделі надлишки фірм дорівнюють їхньому прибутку. Порівняємо суспільний добробут за різних видів конкуренції:

$$W^C(0, 0) - W^B(0, 0) = \frac{\varphi^2(4\gamma + 1)}{4(1 + \varphi)(\varphi^2 - 4)} < 0.$$

Отже, в умовах транспортної монополії суспільний добробут завжди вищий у разі конкуренції за Бертраном, незалежно від асиметрії ринків та продуктової диференціації.

Висновки. У цій роботі обґрунтовуються оптимальні стратегії фірм з вибору місця розташування і виду конкуренції в умовах продуктової диференціації, асиметрії розмірів ринків та транспортної монополії. З цією метою визначаються і порівнюються відповідні стани рівноваги у разі конкуренції за Курно та Бертраном.

Визначено, що транспортна монополія дискримінує фірми за їхнім взаємним розташуванням. Доведено, що у разі агломерації фірм транспортний тариф інваріантний щодо асиметрії ринків, продуктової диференціації та виду конкуренції. У разі дисперсії фірм транспортні тарифи інваріантні тільки щодо асиметрії ринків.

У роботі [8] доводиться, що суспільний добробут вищий у разі конкуренції за Курно у випадку високого рівня асиметрії ринків і транспортного тарифу. Нами доведено, що в умовах транспортної монополії та високого рівня асиметрії суспільний добробут вищий у разі конкуренції за Бертраном.

Показано, що результат [8] про несуттєвий вплив асиметрії ринків на рішення фірм у разі цінової конкуренції зумовлений повною взаємозамінністю товарів. У роботі доведено, що за досить високого рівня асиметрії агломерація на великому ринку є рівновагою Неша у чистих стратегіях, незалежно від виду продуктової диференціації та виду конкуренції.

Подальші дослідження пов'язані з урахуванням впливу інформаційної асиметрії на оптимальні та рівноважні рішення фірм.

ЛІТЕРАТУРА

1. Singh N., Vives X. Price and quantity competition in a differentiated duopoly. *Rand Journal of Economics*. 1984. No. 15. Pp. 546–554.
2. Anderson S., Neven D. Cournot Competition Yields Spatial Agglomeration. *International Economic Review*. 1991. V. 32. No. 4. Pp. 793–808.
3. Hamilton J., Thisse J.-F., Weskamp A. Spatial discrimination, Bertrand vs. Cournot in a model of location choice. *Regional Science and Urban Economics*. 1989. No. 19. Pp. 87–102.
4. Hamilton J., Klein J., Sheshinski E., Slutsky S. Quantity Competition in a Spatial Model. *The Canadian Journal of Economics*. 1994. V. 27. No. 4. Pp. 903–917.
5. Melnikov S. V. Cournot Competition Yields Spatial Dispersion. *Transport Development*. 2020. V. 1. No. 4. Pp. 57–70.
6. Melnikov S. V. Stackelberg-Nash Equilibrium in the Linear City Model. *Automation Remote Control*. 2020. No. 81. Pp. 358–365.
7. Sun C.-H. Cournot and Bertrand Competition in a Model of Spatial Price Discrimination with Differentiated Products. *The B. E. of Theoretical Economics*. 2014. No. 14. Pp. 251–272.
8. Liang W. J., Hwang H., Mai C. C. Spatial discrimination: Bertrand vs. Cournot with asymmetric demands. *Regional Science and Urban Economics*. 2006. No. 36. Pp. 790–802.
9. Takahashi T. Asymmetric transport costs and economic geography. Center for Spatial Information Science. University of Tokyo, Japan. 2007. 31 p.
10. Bai N. Spatial Price Competition under Kinked Transportation Cost. Center for International Research on the Japanese Economy. *Microeconomics Workshop. CIRJE*. 2017. URL: http://www.cirje.e.u-tokyo.ac.jp/research/workshops/micro/micropaper17/micro0116_master3.pdf
11. Palma A., Monardo J. Natural Monopoly in Transport. 2019. URL: <https://ssrn.com/abstract=3927775>
12. Ignatenko A. Price Discrimination in International Transportation: Evidence and Implications. 2020. URL: https://www.annaignatenko.com/JMP_AnnaIgnatenko.pdf

REFERENCES

1. Singh, N., & Vives, X. (1984). Price and quantity competition in a differentiated duopoly. *Rand Journal of Economics*, 15, 546–554.
2. Anderson, S., & Neven, D. (1991). Cournot Competition Yields Spatial Agglomeration. *International Economic Review*, 32 (4), 793–808.
3. Hamilton, J., Thisse, J.-F., & Weskamp, A. (1989). Spatial discrimination, Bertrand vs. Cournot in a model of location choice. *Regional Science and Urban Economics*, 19, 87–102.
4. Hamilton, J., Klein, J., Sheshinski, E., & Slutsky, S. (1994). Quantity Competition in a Spatial Model. *The Canadian Journal of Economics*, 27 (4), 903–917.

5. Melnikov, S. V. (2020). Cournot Competition Yields Spatial Dispersion. *Transport Development*, 1 (4), 57–70.
6. Melnikov, S. V. (2020). Stackelberg-Nash Equilibrium in the Linear City Model. *Automation Remote Control*, 81, 358–365.
7. Sun, C.-H. (2014). Cournot and Bertrand Competition in a Model of Spatial Price Discrimination with Differentiated Products. *The B. E. of Theoretical Economics*, 14, 251–272.
8. 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.
9. Takahashi, T. (2007). Asymmetric transport costs and economic geography. Center for Spatial Information Science. University of Tokyo, Japan. 31 p.
10. Bai, N. (2017). Spatial Price Competition under Kinked Transportation Cost. Center for International Research on the Japanese Economy. Microeconomics Workshop. CIRJE. Retrieved from: http://www.cirje.e.u-tokyo.ac.jp/research/workshops/micro/micropaper17/micro0116_master3.pdf
11. Palma, A., & Monardo, J. (2019). Natural Monopoly in Transport. Retrieved from: <https://ssrn.com/abstract=3927775>
12. Ignatenko, A. (2020). Price Discrimination in International Transportation: Evidence and Implications. Retrieved from: https://www.annaignatenko.com/JMP_AnnaIgnatenko.pdf

**MODEL FOR OPTIMAL PLANNING OF MARKETING ACTIVITY
OF PLANT, PRODUCTION AND TRANSPORTATION
OF PERISHABLE PRODUCTS**

M.Ya. Postan¹, L.S. Filina-Dawidowicz²

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

²DSc, Professor, Faculty of Marine Technology and Transport,
West Pomeranian University of Technology, Szczecin, Poland,
ORCID ID: 0000-0001-6916-6066

Summary

Introduction. During the last decade in theory of logistics and its applications the great attention was paid to the problem of perishable products flows control that was inspired by foods production/transportation growth. Due to importance of this problem even special direction was formed in logistics, so called “cold logistics” which studies warehousing/transportation problems of perishable items taking into account the special regimes of their storage. **The aim** of this paper is the further development of approach pointed out above and development of dynamic optimization model for the case of perishable material and finished perishable product coming through the logistic chain taking into account the control of deterioration process at warehouses and increasing the demand for finished product via additional costs for marketing activity. **Results.** In the article, the dynamic optimization model for planning of raw materials supply, production of perishable finished product and its transportation to destinations is proposed. It is assumed that the additional investments intended for decreasing of raw materials and finished perishable product’s deterioration during its warehousing are provided. The above model is based on the Wagner-Whitin type model in the inventory control theory and classical transportation problem. The objective is to maximize the total profit of supply chain over the given planning horizon. Two cases are considered in details: 1) demand at destinations is given and fixed; 2) demand is controlled by additional investments. **Conclusions.** Our approach allows to increasing the total profit of logistic system due to additional expenses directed on reduction of deterioration of perishable goods. The calculated results may be useful for logistics operators and other participants of logistic cold chain (e. g. warehouses operators, transport companies). The proposed optimization models are relatively simple and may be implemented in practice with the standard software. In order to conduct calculations it is the necessary to collect the relevant data and to create appropriate databases. The results obtained may be used as the basis for our further investigation and research in the field of “cold logistics”.

Key words: supply, production, transportation, perishable finished product, planning, dynamic optimization, marketing, control of deterioration.

МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНУВАННЯ
МАРКЕТИНГОВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ПІДПРИЄМСТВА, ВИРОБНИЦТВА
ТА ТРАНСПОРТУВАННЯ ШВИДКОПСУВНОЇ ПРОДУКЦІЇ

М.Я. Постан¹, Л.С. Філіна-Давідович²

¹д. е. н., професор, зав. кафедри менеджмента і маркетинга,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-4891-3063

²д. т. н., професор, факультет морських технологій і транспорту,
Західноморський технологічний університет, Щецин, Польща,
ORCID ID: 0000-0001-6916-6066

Анотація

Вступ. Протягом останнього десятиліття в теорії логістики та її розробок велика увага приділялася проблемі контролю потоків швидкопсувних продуктів, яка була викликана зростанням виробництва/транспортування харчових продуктів. Враховуючи важливість цього питання, в логістиці навіть сформувався особливий напрямок, так звана «холодна логістика», яка вивчає проблеми складування/транспортування швидкопсувної продукції з урахуванням особливих режимів їх зберігання. **Мета** цієї статті – подальший розвиток зазначеного вище підходу та розробка моделі динамічної оптимізації швидкопсувного матеріалу та готового швидкопсувного продукту, що потрапляє до логістичного ланцюгу з урахуванням контролю процесу псування на складах та збільшення попиту на готовий продукт за рахунок додаткових маркетингових витрат. **Результати.** У статті запропоновано модель динамічної оптимізації планування постачання сировини, виробництва готової швидкопсувної продукції та її транспортування в пункти призначення. Вона також передбачає додаткові інвестиції, спрямовані на зменшення випадків псування сировини та готової швидкопсувної продукції під час її зберігання на складах. Вищезазначена модель заснована на моделі Вагнера-Уїтіна в теорії управління запасами та класичній транспортній задачі. Задача – максимізувати загальний прибуток ланцюга поставок за заданий горизонт планування. Автори детально розглядають два кейса: 1) попит задається і фіксується у пунктах прибуття; 2) попит контролюється додатковими інвестиціями. **Висновки.** Наш підхід дозволяє збільшити загальний прибуток логістичної системи за рахунок додаткових витрат, спрямованих на зменшення псування швидкопсувних товарів. Результати розрахунків можуть бути корисними для логістичних операторів та інших учасників логістичного холодового ланцюга (наприклад, операторів складів, транспортних компаній). Запропоновані оптимізаційні моделі відносно прості і можуть бути реалізовані на практиці за допомогою стандартного програмного забезпечення. Для проведення розрахунків необхідно зібрати відповідні дані та створити бази даних. Отримані результати можуть бути покладені в основу наших подальших розвідок та досліджень у сфері «холодної логістики».

Ключові слова: постачання, виробництво, транспортування, швидкопсувна готова продукція, планування, динамічна оптимізація, маркетинг, контроль псування.

Introduction. During the last decade in theory of logistics and its applications the great attention was paid to the problem of perishable products flows control that was inspired by foods production/transportation growth. Due to importance of this problem even special direction was formed in logistics, so called “cold logistics” which studies warehousing/transportation problems of perishable items taking into account the special regimes of their storage [1–3]. Due to the report presented by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) [4] roughly one third of the food produced for human consumption in the world gets lost or wasted (approximately 1.3 billion tones every year). These processes are observed throughout all stages of the supply chain, from initial production up to final consumption. These losses are high both in industrialized and developing countries. More than 40 % of the food losses take place at post harvest and processing levels in developing countries. In industrialized countries, the majority of food losses occur at retail and consumer levels (more than 40 % of overall losses). It is well-known that inventory control theory plays an important role in logistical applications. Indeed, integrated logistical management first of all is intended for development of optimal supply plan, work-in-process and production plans, as well as optimal transportation plans for perishable finished product delivery to destination. At the same time the known models from inventory control theory cannot be applied in the “cold logistics” practices immediately. In many real situations arising in logistical management it is needed to adopt and generalize the classical models of inventory control theory for the case of deterioration of perishable materials and finished product under prolonged warehousing. Deterioration can deal with products spoilage, physical depletion, gradual loss of qualitative properties of materials with the passage of time and above all storage conditions changing [5; 6]. It is naturally to suppose that the volume of perishable products deterioration depends: a) on technical characteristics of refrigerating equipment and corresponding cost directed on supporting of special warehousing regimes; b) on additional costs directed on increasing the demand via additional costs for marketing activity of the plant.

In the articles [7–9] the simple models for optimal lot sizing of perishable product based on generalization of the classical Wilson model were studied. However, in the cited works the possibility of warehousing regime control was not considered. In the studies [10; 11] the models were proposed for optimal planning of integrated logistic chains functioning including supply of materials, manufacturing of perishable finished product and its delivery at points of destination based on generalization of the Wagner-Whitin model from inventory control theory.

The aim of this paper is the further development of approach pointed out above and development of dynamic optimization model for the case of perishable material and finished perishable product coming through the logistic chain taking into account the control of deterioration process at warehouses and increasing the demand for finished product via additional costs for marketing activity. This idea was firstly mentioned in our previous works [12–14].

Main results of investigation. Our first target is construction the corresponding mathematical model for solving the problem under consideration. Firstly, we consider more simple case of fixed demand.

Let us consider a plant which produces the K types of perishable finished product subjected to deterioration under storage at the plant’s warehouse. To manufacture these

products the R kinds of material and complete set are used which are subjected to deterioration during their storage, as well. It is assumed that the matrix

$$A = \|a_{rk}\|, k = 1, 2, \dots, K; r = 1, 2, \dots, R,$$

of technological coefficients is given, where a_{rk} is the amount of the r -th kind of material needed for manufacturing of the k -th type of perishable finished product's unit.

A plant purchases all kinds of materials at the R suppliers. The finished perishable products must be shipped to the N destinations. The planning horizon is T (time is measured in discrete units). The total demand for the k -th type of perishable finished product at the n -th destination over the period T is known and equals to $d_{kn} > 0$ (it may be determined, for example, in result of market's analysis). Taking into account the given demand, plant purchases the materials and manufactures the products (See Figure).

In addition, we make the following assumptions:

- The market of materials is unlimited.
- All ordering of materials and delivering of finished perishable products occurs at the start of each period. Inventories of materials are charged on the amount on hand in the end of each period.
- The lead time is zero; that is, an order arrives as soon as it is placed.
- The time of transportation of any amount of perishable finished product to any destination doesn't depend on this amount.
- The production equipment is absolutely reliable.
- The capacities of production lines of plant are limited only by capacities of warehouses' for storage of materials and finished perishable products.

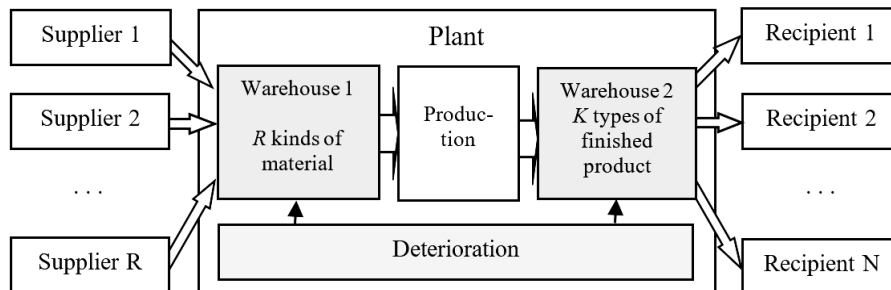


Figure. The part of logistic chain of perishable product (Source: own research)

Similarly as in the article [10] for better understanding, we introduce the following designations:

- Let x_{rt} be the amount of the r -th kind of material ordered and purchased in period t , for $t = 1, 2, \dots, T$.
- Let y_{kt} be the amount of the k -th type of perishable finished product which plant plans for output in the end of period t , for $t = 1, 2, \dots, T$.
- Let z_{knt} be the amount of the k -th type of perishable finished product planned for delivery to the n -th destination in the end of period t , for $t = 1, 2, \dots, T$.
- Let s_{knt} be the sale unit price for the k -th type of perishable finished product shipped to the n -th destination in period t , for $t = 1, 2, \dots, T$.
- Let P_{rt} be the per unit order cost and K_{rt} be the fixed order cost for the r -th kind of material ordered in period t , for $t = 1, 2, \dots, T$.

- Let e_{kt} be the per unit production cost of the k -th type of perishable finished product in period t , for $t = 1, 2, \dots, T$.
- Let c_{knt} be the cost of transportation of the unit of the k -th type of perishable finished product from plant to the n -th destination in period t , for $t = 1, 2, \dots, T$.
- Let $h_{1rt}(h_{2kt})$ be the holding cost per unit of the r -th kind of material (of the k -th type of perishable finished product) in period t , for $t = 1, 2, \dots, T$.
- Let $C_1(C_2)$ be the warehouse's capacity for storage of materials (perishable finished products).
- Let $q_{1r}(q_{2k})$ be the initial inventory level of the r -th kind of material (of the r -th type of perishable finished product). It is assumed that

$$\sum_{r=1}^R q_{1r} \leq C_1, \quad \sum_{k=1}^K q_{2k} \leq C_2.$$

- Let $I_{1rt}(I_{2kt})$ be the inventory level of the r -th kind of material (of the k -th type of perishable finished product) in the end of period t , for $t = 1, 2, \dots, T$.
- Let us $0 \leq \beta_{1r}, \beta_{2k} \leq 1$ are the coefficients describing the deterioration of the r -th kind of material and the k -th kind of perishable finished product during their storage at warehouses correspondingly.
- It is assumed that during the delivery of material to a plant and delivery of perishable finished product at destinations there are not subject to any deterioration. To avoid the trivial situations, we shall suppose that

$$\sum_{n=1}^N d_{kn} > q_{2k}, \quad k = 1, 2, \dots, K.$$

It is obvious that the following inventory-balanced equations are valid:

$$I_{1rt} = (1 - \beta_{1r})I_{1r,t-1} + x_{rt} - \sum_{k=1}^K a_{rk}y_{kt}, \quad r = 1, 2, \dots, R, \quad (1)$$

$$I_{2kt} = (1 - \beta_{2k})I_{2k,t-1} + y_{kt} - \sum_{n=1}^N z_{knj}, \quad k = 1, 2, \dots, K; \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad (2)$$

where $I_{1r0} = q_{1r}, I_{2k0} = q_{2k}$.

From (1), (2), it follows the relations

$$I_{1rt} = (1 - \beta_{1r})^t [q_{1r} + \sum_{j=1}^t (x_{rj} - \sum_{k=1}^K a_{rk}y_{kj}) / (1 - \beta_{1r})^{t-j}], \quad (3)$$

$$r = 1, 2, \dots, R,$$

$$I_{2kt} = (1 - \beta_{2k})^t [q_{2k} + \sum_{j=1}^t (y_{kj} - \sum_{n=1}^N z_{knj}) / (1 - \beta_{2k})^{t-j}], \quad (4)$$

$$k = 1, 2, \dots, K.$$

Since

$$\sum_{r=1}^R I_{1rt} \leq C_1, \quad \sum_{k=1}^K I_{2kt} \leq C_2, \quad t = 1, 2, \dots, T,$$

then from (3), (4), we obtain

$$\sum_{r=1}^R (1 - \beta_{1r})^t q_{1r} + \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^t (1 - \beta_{1r})^{-j} x_{rj} - \sum_{j=1}^t \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^K (1 - \beta_{1r})^{-j} a_{rk}y_{kj} \leq C_1, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^K (1 - \beta_{2k})^t q_{2k} + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^t (1 - \beta_{2k})^{-j} y_{kj} - \\ & - \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^t (1 - \beta_{2k})^{-j} z_{knj} \leq C_2. \end{aligned} \quad (6)$$

On the other hand, in period t it cannot be consumed the r -th material and delivered the k -th product in amounts more than inventory levels $I_{1,r,t-1}$ and $I_{2,k,t-1}$ correspondingly in the end of period $t-1$, that is:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^K a_{rk} y_{kt} \leq I_{1,r,t-1}, \quad r = 1, 2, \dots, R, \\ & \sum_{n=1}^N z_{knt} \leq I_{2,k,t-1}, \quad k = 1, 2, \dots, K, \end{aligned}$$

Therefore, from (5), (6) we get

$$\sum_{k=1}^K a_{rk} y_{rt} + \sum_{j=1}^{t-1} \sum_{k=1}^K a_{rk} y_{kj} (1 - \beta_{1r})^j \leq q_{1r} (1 - \beta_{1r})^{t-1} + \sum_{j=1}^{t-1} x_{rj} (1 - \beta_{1r})^j, \quad r = 1, 2, \dots, R, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{n=1}^N z_{knt} + \sum_{j=1}^{t-1} \sum_{n=1}^N z_{knj} (1 - \beta_{2k})^j \leq q_{2k} (1 - \beta_{2k})^{t-1} + \\ & + \sum_{j=1}^{t-1} y_{kj} (1 - \beta_{2k})^{t-1}, \quad k = 1, 2, \dots, K; \quad t = 1, 2, \dots, T. \end{aligned} \quad (8)$$

At last, the perishable finished product of the k -th kind must be delivered at the n -th destination in amount d_{kn} over the planning horizon, that is

$$\sum_{t=1}^T z_{knt} = d_{kn}, \quad n = 1, 2, \dots, N; \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (9)$$

In the model described above the coefficients of materials and finished perishable product deterioration β_{1r} , β_{2k} may be considered as control variables, as well. Indeed, generally speaking, they may depend on power of refrigerating equipment of plant or, in value expression, on this equipment price. Denote V_1 and V_2 the values of refrigerating equipment at warehouses for material and finished product correspondingly. It is naturally to suppose that $\beta_{1r}(V_1)$, $\beta_{2k}(V_2)$ are the non-increasing functions of their variables satisfying the following conditions

$$\beta_{1r}(\infty) = 0, \beta_{2k}(\infty) = 0, \quad \beta_{1r}(0) = 1, \beta_{2k}(0) = 1. \quad (10)$$

The simplest dependencies of such kind, for example, are

$$\beta_{1r}(V_1) = \frac{\beta_{1r}}{(1 + \mu_{1r} V_1)^{\alpha_r}}, \quad \beta_{2k}(V_2) = \frac{\beta_{2k}}{(1 + \mu_{2k} V_2)^{\gamma_k}}, \quad (11)$$

where μ_{1r} , μ_{2k} , α_r , γ_k are the positive coefficients determining by methods of mathematical statistics; β_{1r} , β_{2k} are the deteriorating coefficients reflecting basic deterioration without additional cost for its reduction.

Note that according to above designations the expressions $p_{rt} \beta_{1r} I_{1rt}$ and $s_{knt} \beta_{2k} I_{2kt}$ have the meaning of economic losses caused by deterioration of the r -th kind of materials and the k -th kind of finished perishable product during their storage in period t correspondingly.

The demand d_{kn} in the right-hand side of relation (9) may also be considered as control value. Let us suppose that d_{kn} is the a no decreasing function of values V_3 . The possible dependence d_{kn} on V_3 may be, for example, as follows

$$d_{kn}(V_3) = d_{kn}(1 + \lambda_{kn} V_3)^s, s \geq 0,$$

where d_{kn} is demand for the case $V_3 = 0$ (i. e. without additional cost for marketing).

Expression for total profit of all integrated logistical chain (i. e. objective function) taking into account the cost for control of refrigerating regimes is

$$\begin{aligned} P = & \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K p_{knt} z_{knt} - \sum_{k=1}^K [e_{kt} y_{kt} + (h_{2kt} + s_{knt} \beta_{2k}) ((1 - \beta_{2k})^t q_{2k} + \right. \\ & + \sum_{j=1}^t (1 - \beta_{2k})^{-j} y_{kt} - \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^t (1 - \beta_{2k})^{-j} z_{knj})] - \\ & - \sum_{r=1}^R [p_{rt} x_{rt} + K_{rt} \delta(x_{rt}) + (h_{1rt} + p_{rt} \beta_{1r}) ((1 - \beta_{1r})^{-j} q_{1r} + \\ & \left. + \sum_{j=1}^t (1 - \beta_{1r})^{-j} x_{rt} - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^t (1 - \beta_{2r})^{-j} a_{rk} y_{kt})] \right\} - V_1 - V_2 - V_3, \end{aligned} \quad (12)$$

where $p_{knt} = s_{knt} t - c_{knt}$; $\delta(x) = 1$, if $x > 0$, $\delta(0) = 0$.

The optimization problem may be now formulated by the following way: it is needed to find out the nonnegative values of variables $x_{rt}, y_{kt}, z_{knt}, V_1, V_2, V_3$ satisfying the conditions (5)–(9), (11) and maximizing the function (12). This optimization problem may be solved by the method of dynamic programming [14]. The other method of its solving is based on the method proposed in the work [15]. This method allows to eliminate from consideration the non-differentiable term $K_{rt} \delta(x_{rt})$ entering the function (12) by introduction of additional variables.

Conclusions

In this paper, we proposed the approach to modeling and optimization of integrated logistics system functioning for the case of perishable materials and finished perishable goods which is based on inventory control theory application. The main idea of our approach is coordination among supply firm, plant, and transport companies at the stage of their joint plans development over the finite planning horizon. Our approach allows to increasing the total profit of logistic system due to additional expenses directed on reduction of deterioration of perishable goods. The calculated results may be useful for logistics operators and other participants of logistic cold chain (e. g. warehouses operators, transport companies). The proposed optimization models are relatively simple and may be implemented in practice with the standard software. In order to conduct calculations it is the necessary to collect the relevant data and to create appropriate databases. The results obtained may be used as the basis for our further investigation and research in the field of “cold logistics”.

REFERERCES

1. Chen, L., & Notteboom, T. (2012). Distribution and value added logistics in the cold chain product market with application to the role of seaports. 5th ALRT Conference, Vancouver, 14–15.
2. Laguerre, O., Hoang, H. M., & Flick, D. (2013). Experimental investigation and modeling in the food cold chain: Thermal and quality evolution. Trends Food Science & Technology, 29 (2), 87–97.
3. Zhang, Y., & Chen, X. D. (2014). An Optimization Model for the Vehicle Routing Problem in Multi-product Frozen Food Delivery, Journal of Applied Research and Technology, 12 (2), 239–250.

4. FAO: Global food losses and food waste – extent, causes and prevention. Rome, 2011.
5. Evans, J. (2011). Effects of food and beverages storage, distribution, display and customer handling on shelf life. In: Kilcast, D., Subramaniam, P. Food and Beverage Stability and Shelf Life, Woodhead Publishing Limited, 273–300.
6. Kundu, A., Chakrabarti, P., & Chakrabarti, T. (2013). An EOQ model for time-dependent deteriorating items with alternating demand rates allowing shortages by considering time value of money. *Yugoslav Journal of Operations Research*. 23 (2), 263–278.
7. Dash, B. P., Singh, D. P., & Pattnayak, T. H. (2014). An Inventory Model for Deteriorating with Exponential Declining Demand and Time-Varying Holding Cost. *American Journal of Operations Research*, 4, 1–7.
8. Li, R., Lan, H., & Mawhinney, J. R. (2010). A Review on Deteriorating Inventory. *European Journal of Operational Research*, 3 (1), 117–129.
9. Shah N. H., & Shah, Y. K. (2000). Literature Survey on Inventory Models for Deteriorating Items. *Economics Annals*, 44, 221–237.
10. Morozova I. V., Postan, M. Ya., & Dashkovskiy, S. N. (2012). Dynamic Optimization Model for Planning of Integrated Logistical System Functioning. In: Kreowski, H.-J., Scholz-Reiter, B., Thoben, K.-D. Dynamics in Logistics, Proc. of 3d International Conference, Bremen, Germany, Springer, Berlin, 291–300.
11. Postan, M. Ya. (2014). Optimal Planning of Integrated Logistical System Functioning Taking into Account Environment Protection. In: Vlachos, I. P., Malindretos, G. Markets, Business, and Sustainability. Bentham e-Books, 205–219. <http://ebooks.benthamsience.com/book/9781681080253>
12. Postan, M. Ya., & Filina-Dawidowicz, L. S. (2013). Dynamiczny Model Optimalizacyjny Procesu Planowania Zapasow I Dostaw Zroznicowanych Asortymentowo Produktow Szybko Psujacychsiy. In: Semenov, I. N., Wiktorowska-Jasik, A. Transport w Regionie Pomorza Zachodniego. Szczecin, 13–20.
13. Filina-Dawidowicz, L., & Postan, M. Ya. (2016). Optimal Inventory Control for Perishable Items under Additional Cost for Deterioration Reduction. *LogForum*. 12 (2), 147–156.
14. Postan, M. Ya., & Kurudzhi, V. (2021). Model of Optimal Manufacturing and Delivering of Final Product to Consumers Taking Into Account Cost for Marketing. *Development of management and entrepreneurship methods on transport*. 2 (75), 66–76.
15. Hadly, G. Nonlinear and dynamic programming. 1964, 414 p.
16. Balinski, M. L. (1961). Fixed cost transportation problem. *Naval Res. Log. Quart.*, 8 (1), 41–54.
17. Williams, A. C. (1963). A stochastic transportation problem. *Opns Res*, 11 (5), 59–77.

РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

UDC 621.436:629.128.6

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.1-12.03>

VIBROACOUSTIC DIAGNOSTICS OF MARINE DIESEL ENGINE TURBOCHARGER

R.A. Varbanets¹, O.V. Fomin², V.G. Klymenko³, D.S. Minchev⁴,
V.P. Malchevsky⁵, V.I. Zalozh⁶

¹DSc, Head of the Department Marine Power Plants and Technical Operation,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-6730-0380

²DSc, Professor at the Department of Cars and Carriage Facilities,
State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, Ukraine,
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

³Assistant at the Department of Marine Power Plants and Technical Operation,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine

⁴Ph. D., Associate Professor at the Department of Internal Engines,
Installations and Technical Maintenance,
National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5960-3063>

⁵Ph. D., Associate Professor at the Department of Marine Power Plants
and Technical Operation,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-6730-0380

⁶Ph. D., Associate Professor at the Department of Engineering Sciences,
Danube Institute of National University "Odessa Maritime Academy",
Izmail, Ukraine,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5213-6896>

Summary

Introduction. Modern turbochargers of marine diesel engines enjoy a high boost pressure ratio in the compressor of up to 5 and above. They create high pressure of the charged air, thus providing high-specific power and high-efficiency operation of the marine engine with low-level emission of carbon oxides and soot. High efficiency of MAN MC and MAN ME diesel engines with actual specific fuel consumption of 160–170 g/kWh is ensured by the high pressure of the charged air, among other factors. In case the turbocharger loses in performance, the power and efficiency of the diesel engine rapidly decline while the emission level of carbon oxides and soot increases. The allowable hazardous emission level of marine diesel engines in operation is limited by the current requirements of the International Maritime Organization. Since the overwhelming majority of various maritime transport vessels use diesel power units, the matter of their efficient and safe operation is undoubtedly of current interest. **The article presents the method of vibroacoustic diagnostics of the marine diesel engine turbocharger under operating conditions, when a prompt determination of instantaneous turbocharger speed**

and rotor vibration level is required. The method lies in the analysis of the vibroacoustic signal that is generated by the compressor of the turbocharger with the diesel engine running under load. **Results.** The spectral analysis reveals that the compressor blades generate acoustic oscillations that are always present in the overall vibroacoustic spectrum of the turbocharger regardless of its technical condition. The “blades” harmonic that corresponds to these vibrations can be detected in the spectrum using the method of limits. The calculated instantaneous turbocharger speed makes it possible to analyze the amplitude of the main harmonic in the spectrum. The method presented in the paper helps eliminate the Discrete Fourier Transform (DFT) spectral leakage, so that the amplitude of the main harmonic can be estimated. The further analysis of the amplitude of the main harmonic allows for efficient estimation of the turbocharger rotor vibration level when in operation. The method can be practically applied by the means of a smartphone or a computer that have the dedicated software installed. **Conclusions.** The proposed method can lay the foundation for the permanent monitoring system of the turbocharger speed and vibration level in the marine diesel engine.

Key words: turbocharger diagnostics, marine diesel engine, vibroacoustic spectral analysis, DFT leakage.

ВІБРОАКУСТИЧНА ДІАГНОСТИКА ТУРБОКОМПРЕСОРА СУДНОВОГО ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА

Р.А. Варбанець¹, О.В. Фомін², В.Г. Клименко³, Д.С. Мінчев⁴,
В.П. Мальчевський⁵, В.І. Залож⁶

¹д. т. н., професор, завідувач кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації,

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6730-0380>

²д. т. н., професор кафедри вагонів та вагонного господарства,
Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна,
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

³асистент кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна.

⁴к. т. н., доцент кафедри двигунів внутрішнього згоряння,
установок та технічного обслуговування,
Національний університет кораблебудування
імені Адмірала Макарова, Миколаїв, Україна,
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5960-3063>

⁵к. т. н., доцент кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3117-1251>

⁶к. т. н., доцент кафедри інженерних дисциплін,
Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»,
Ізмаїл, Україна,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5213-6896>

Анотація

Вступ. Сучасні турбонагнітачі суднових дизельних двигунів мають високий коефіцієнт підвищення тиску в компресорі – до 5 і вище. Вони створюють високий тиск наддувочного повітря, тим самим забезпечуючи високу питому

потужність і високоефективну роботу суднового двигуна з низьким викидом оксидів вуглецю та сажі. Серед іншого, висока економічність дизельних двигунів MAN MC і MAN ME з фактичною питомою витратою палива на рівні 160–170 г/кВт·год забезпечується високим тиском наддувочного повітря. При зниженні ефективності роботи турбонагнітача, потужність і економічність дизельного двигуна швидко знижуються, а рівень викидів оксидів вуглецю та сажі зростає. Допустимий рівень шкідливих викидів при експлуатації судових дизельних двигунів обмежений чинними вимогами Міжнародної морської організації. Оскільки переважна більшість морських транспортних суден різного класу має дизельні двигуни, питання їх ефективної та безпечної експлуатації є безумовно актуальним. **У статті представлено метод віброакустичної діагностики турбокомпресора суднового дизельного двигуна в умовах експлуатації, коли необхідно оперативно визначити миттєву частоту обертання турбокомпресора та рівня вібрації ротора. Метод полягає в аналізі віброакустичного сигналу, який формується компресором турбонагнітача під час роботи дизельного двигуна під навантаженням. Результати.** Спектральний аналіз показує, що лопатки компресора генерують коливання, які завжди присутні в спектрі загальної вібрації турбонагнітача незалежно від його технічного стану. «Лопаткова» гармоніка, яка відповідає цим коливанням, в спектрі визначається за допомогою методу обмежень. Розрахована миттєва частота обертання турбокомпресора дозволяє проаналізувати амплітуду основної гармоніки в спектрі. Метод, представлений у статті, допомагає усунути спектральні витoki дискретного перетворення Фур'є (DFT), щоб оцінити амплітуду основної гармоніки. Подальший аналіз амплітуди основної гармоніки дозволяє ефективно оцінити рівень вібрації ротора турбокомпресора під час експлуатації. Метод можна застосувати на практиці за допомогою смартфона або комп'ютера, на якому встановлено спеціальне програмне забезпечення. **Висновки.** Запропонований метод може бути закладений в основу системи постійного моніторингу частоти і рівня вібрації турбокомпресора суднового дизельного двигуна.

Ключові слова: діагностика турбокомпресора, судновий дизельний двигун, віброакустичний спектральний аналіз, виток ДПФ.

1. Introduction

Modern turbochargers (T/C) of marine diesel engines enjoy a high boost pressure ratio in the compressor of up to 5 and above. They create high pressure of the charged air, thus providing high-specific power and high-efficiency operation of the marine engine with low-level emission of carbon oxides and soot [1]. High efficiency of MAN MC and MAN ME diesel engines with actual specific fuel consumption of 160–170 g/kWh is ensured by the high pressure of the charged air, among other factors [2–3]. In case the turbocharger loses in performance, the power and efficiency of the diesel engine rapidly decline while the emission level of carbon oxides and soot increases [1–3].

The allowable hazardous emission level of marine diesel engines in operation is limited by the current requirements of the International Maritime Organization (IMO) [4]. Since the overwhelming majority of various maritime transport vessels use diesel power units, the matter of their efficient and safe operation is undoubtedly of current interest [5–7].

When a marine diesel engine is operating in light-load conditions, the incomplete combustion products clog up the exhaust manifolds. This results in the change of the flow capacity of the exhaust manifolds as well as the character of the gas internal flow in front of the blades of the turbocharger wheel. Pulsations might occur, which causes the rotor to vibrate [8–10]. Increased level of rotor vibration creates additional loads on turbocharger bearings and reduces their operational life. In case of microdefects in the bearings, the vibration level of the rotor increases even further, which might lead to a severe failure [11].

Vibroacoustic control of the turbocharger in operation makes it possible to detect the dangerous tendency of the vibration level increase of the rotor and indicate the need for cleaning the flow channel [8–11]. In some cases, such control might prevent turbocharger failure, which typically leads to a considerable loss of power and efficiency of the entire engine [1; 11–14].

Many authors have previously pointed out the necessity of conducting operating periodic check of the turbocharger technical condition in operation [11–14]. In such event, prompt and timely diagnostics during operation can be made by analysis of the external vibroacoustic signals. In papers [11; 12] it is indicated that within the spectrum of vibroacoustic oscillations of the turbocharger, regardless of its technical condition, there is always a harmonic present at the “blades frequency” of the compressor wheel. The amplitude of the “blades harmonic” of the compressor considerably exceeds (two, three times or even more) the level of surrounding harmonics in the turbocharger spectrum [8; 12]. Meanwhile, the harmonic of the main rotation frequency of the turbocharger rotor might have insignificant amplitude and might not be distinguishable against the noises of the spectrum [8]. Thus, the “blades harmonic” is the primary source of the turbocharger spectrum analysis and it can be identified in the spectrum using the method of limits.

The paper presents the diagnostic method based on the determination of the “blades” harmonic in the turbocharger spectrum, further calculation of the rotor main speed as well as the subsequent analysis of the harmonic amplitude at its main frequency. The amplitude of the main frequency harmonic characterizes the general vibration level of the turbocharger rotor [5; 6; 15].

The article begins with the analysis of the vibroacoustic signals of the TCA 66 and the VTR 564 turbochargers of low speed diesel engines during their normal operation. The limits of normal and abnormal levels of the amplitude of the main harmonic are illustrated by these two examples. These cases, however, are particular, so it is necessary to analyze the vibroacoustic spectrums of a larger number of turbochargers to develop general recommendations. Nevertheless, we believe that the information will be useful for marine engineers, since these engines are widely used in the merchant marine fleet.

To make the results of analysis more reliable the algorithm of the “leakage effect” eliminating is proposed, which helps to calculate more accurately the frequency and amplitude of the given signal.

A functional diagram of the turbocharger continuous monitoring system is proposed as the general conclusion of the paper.

The method in question can be practically applied; for its realization in most cases, it would suffice to have a smartphone or a personal computer with the dedicated

software. The method lies in the analysis of the vibroacoustic signal that is generated by the turbocharger compressor while the diesel engine is operating under load.

2. TCA 66 turbocharger of low speed diesel engine vibroacoustic analysis

The registration and analysis of vibroacoustic signals of the TCA 66-20072 turbocharger [3], which is installed on the MAN 5S60MC main diesel engine [2], was made at the 85 rpm of engine speed. Estimated engine brake power was ≈ 4500 kW or 50 % of MCR. According to the sea trials results, the corresponding turbocharger speed should be about 10 300 rpm (see Table 1). The compressor impeller wheel of the TCA66-20072 has 22 blades (11 full blades and 11 splitter blades) [3].

Mechanical engineers provide engine performance analysis during its operation to estimate engine and turbocharger current conditions. The results of performance analysis should be compared with manufacturer's Official Test Data. Among the most important engine parameters for diagnostics are: crank speed and brake power; brake specific fuel consumption; supercharged air pressure; compression pressure and maximum in-cylinder pressure; exhaust gases temperature at the turbocharger inlet and outlet, and turbocharger speed (Table 1).

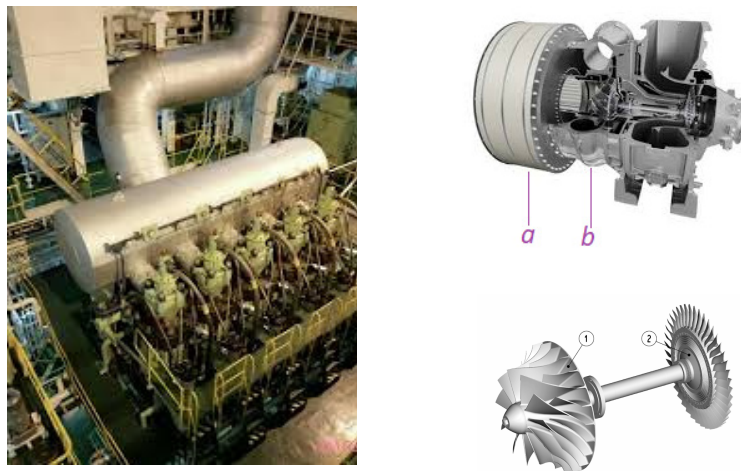


Figure 1. Engine 5S60MC and TCA 66-20072 turbocharger,
1 – compressor wheel, 2 – turbine rotor [3],
(a), (b) – vibroacoustic measuring points

Deviations of these parameters for given engine operating point may be caused by some failures. Thus, for instance, the compression pressure (P_{comp}) drop may be caused by cylinder liner wear, piston rings break or sticking, exhaust valve seat leakage/wrong timing or by smaller supercharged air pressure (P_{scav}). The reasons of the maximum combustion pressure (P_{max}) decrement are generally related to the high-pressure fuel-injection equipment. Smaller exhaust gases temperatures difference at the turbine inlet and outlet ($\Delta T/C$) together with turbocharger speed (T/C rpm) reduction indicate the flow duct fouling (Table 1).

$$\Delta T/C = T/C_{in} - T/C_{out}.$$

Suggested method allows the on-going turbocharger speed measuring at engine operation. The compressor vibroacoustic signal registration could be carried out either

at the compressor inlet filter (Figure 1, *a*) or directly at the compressor volute surface (Figure 1, *b*) as it is known from the experiment. The second option (point *b*) benefits from the inlet flow aerodynamic noise absence.

The aerodynamic noise could also be removed from the recorded signal, if the microphone, (positioned at point *a*) has the perpendicular orientation to the turbocharger intake filter surface, so the smooth air flow around the microphone is provided. The influence of the noise of other engine mechanisms is relatively small as their sources generally have a big enough distance to the microphone position as it is known from the set of experiments carried out on the number of marine low-speed engines.

Table 1

The main engine 5S60MC Official Test Data

Load, kW	% MCR	Engine RPM	T/C RPM	T/C in t, °C	T/C out t, °C	P scav bar	P max bar	P comp bar	SFOC g/kWh
2208	25	66,1	6150	270	230	0,38	63	43	177,58
4407	49,9	83	9880	300	220	1,06	97,4	66,6	172,99
6621	75	95,4	12050	320	200	1,78	129,8	95	168,16
7937	89,9	101,5	13120	350	210	2,28	139,8	110,2	169,72
8824	99,9	105,3	13850	372	220	2,62	139,8	124	171,13
8820	99,9	105,1	13850	375	220	2,62	139,6	123,8	171,15
9673	109,5	108,2	14540	410	240	2,96	140	136	172,50

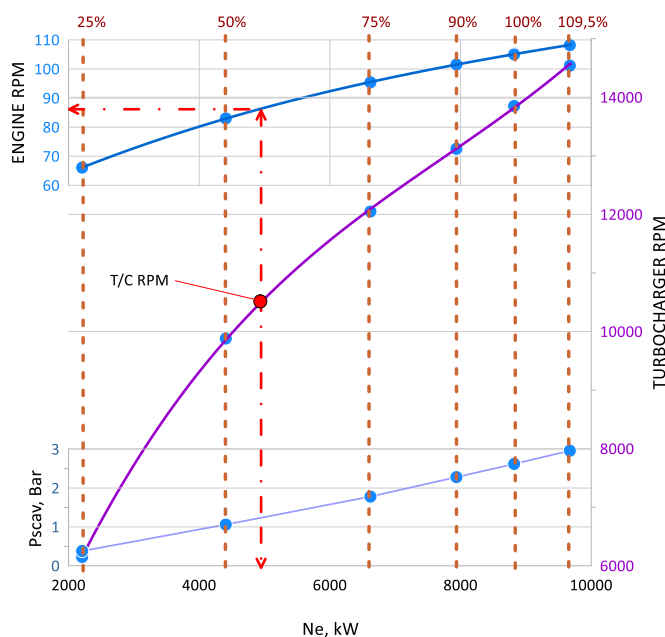


Figure 2. The main engine 5S60MC official test data (engine RPM, Turbocharger RPM, P scav)

According to the Table 1 data, the polynomial equation for the turbocharger speed in respect to the engine brake power was developed (see Table 2). This model can be

applied in practice for fast main engine brake power estimation using the data from vibroacoustic turbocharger analysis. It is valid for known engine and ship hull conditions and for given value of cargo.

Table 2

Polynomial model [5] T/C rpm = f (Ne, kW)	
Equation type: T/C rpm = ((Degree3 × Ne + Degree2) × Ne + Degree1) × Ne + Degree0	
Coefficients:	Degree 0 = -25.8849715 Degree 1 = 3.508765178 Degree 2 = -0.0003549392173 Degree 3 = 1.531921627E-08
Model results:	Coefficient of determination, R ² = 0.999909 Correlation coefficient, R = 0.999954499

The compressor impeller blades generate oscillations in the general spectrum of vibrations regardless of the turbocharger technical conditions as it was experimentally proven [5; 8; 11]. Spectral analysis shows that the vibroacoustic signal from the compressor blades has the frequency equal to the turbocharger rotor speed multiplied by the blades number (see Figure 3):

$$v_b = n_b \times \text{T/C rpm} / 60 \quad (1)$$

were v_b – blades frequency of the turbocharger, Hz; n_b – total number of compressor wheel blades; T/C rpm – turbocharger speed, rpm.

Assuming that current engine operating point is between 100 % and 25 % of MCR, so the top and bottom limits for turbocharger speed could be estimated (for MAN 5S60MC engine):

- Max blade frequency ($v_{b \max}$) = $n_b \times \max \text{ T/C rpm} / 60 = 22 \text{ blades} \times 13850 \text{ rpm} / 60 = 5078 \text{ Hz}$,
- Min blade frequency ($v_{b \min}$) = $n_b \times \min \text{ T/C rpm} / 60 = 22 \text{ blades} \times 6150 \text{ rpm} / 60 = 2255 \text{ Hz}$.

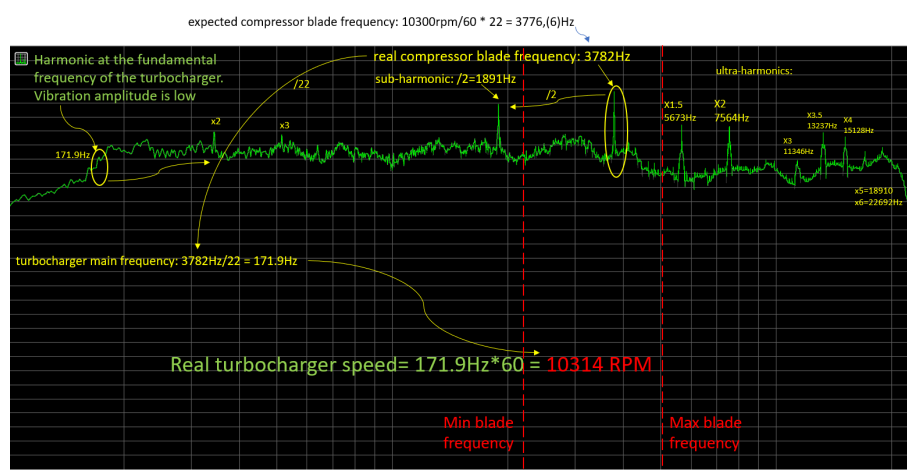


Figure 3. The spectrum of the vibroacoustic signal of the compressor of the TCA 66-20072 turbocharger at 50 % load mode of the engine 5S60MC (4500 kW, 85 rpm)

Thus, the “blades” harmonic in the general turbocharger spectrum lies between these limits (Figure 3):

$$v_{b \min} < v_b < v_{b \max}$$

The experimental measurements (Figure 4) were made with the electret microphone EM-4015-BC produced by Soberton Inc. [16]. The microphone has high sensitivity, wide pass band, narrow directional pattern, small distortion and low noise level. It should be noted, that due to the current microphone upper limit the presented spectrum above 12 kHz could be incorrect, but it isn't significant as for the low-speed diesel engines turbochargers it isn't necessary to record the signal over 10 kHz, so it doesn't affect the conclusion.



Figure 4. Recording the vibration of turbocharger using the EM-4015-BC electret microphone

The spectrum analysis (from Figure 3) reveals the value of actual blades frequency: 3782 Hz. Thus, the actual turbocharger speed equals to: $3782 \text{ Hz} / 60 = 171.9 \text{ Hz}$. So, for a given engine operating point the TCA 66-20072 turbocharger actual speed is equal to: $171.9 \text{ Hz} \times 60 = 10314.5 \text{ rpm}$.

It is notable that the main frequency (171,9 Hz) harmonic amplitude is relatively small and could be estimated at the range of spectrum noise. This could be assumed as the indication of small turbocharger rotor vibrations level and highly probable as the indication of the rotor bearings normal conditions [8; 12].

Vibroacoustic spectrum of TCA 66-20072 turbocharger also has sub-harmonics and ultra-harmonics:

- sub-harmonic $x0.5 = 1891 \text{ Hz}$;
- ultra-harmonics $x2 = 7564 \text{ Hz}$, $x3 = 11346 \text{ Hz}$, $x4 = 15128 \text{ Hz}$, $x5 = 18910 \text{ Hz}$, $x6 = 22692 \text{ Hz}$.

Sub-harmonics and ultra-harmonics could be used as additional diagnostic signs for further experimental measurements of turbocharger operation.

For the signal, recorded at 44.1 kHz of frequency it is possible to make spectrum analysis for harmonics with frequency up to 22.05 kHz [17]. For the most marine engines the “blades” frequency of turbocharger is always at least 2 times smaller. Maximum frequency of recorded signal is also limited by the microphone characteristics. As the possible step for spectrum analysis is down to 1 Hz, the absolute error of turbocharger frequency estimation is generally $<1 \text{ rpm}$. The measurement time should be related to the response time of a turbocharger, which is typically about 1 to 3 s. So, the accuracy

of suggested method for turbocharger frequency measurement exceeds the typical accuracy of standard measuring devices.

Suggested method could be used for accurate measurements of instantaneous turbocharger speed, turbocharger rotor vibrations level estimation and for rough estimation of the engine brake power.

3. VTR 564 turbocharger of low speed diesel engine vibroacoustic analysis

Another set of experimental research was carried out for ABB VTR 564-31 turbocharger [18], installed of the MAN 6L80MCE main marine engine of the capsized bulker [19]

The compressor impeller has 20 blades and its vibroacoustic spectrum for the engine operating point close to MCR is shown in Figure 5. The assumed value of turbocharger speed for such conditions should be smaller than the turbocharger speed at the engine rated power. So, the turbocharger speed for MCR operated point could serve as the top limit.

$$\begin{aligned} \text{Max blade frequency (vb max)} &= nb \times \text{max T/C rpm} / 60 = \\ &= 20 \text{ blades} \times 9000 \text{ rpm} / 60 = 3000 \text{ Hz.} \end{aligned}$$

As the engine operating point could be estimated as close to MCR or at least between 50 % and 100 % of MCR, the bottom limit of the turbocharger speed could be assumed as ($v_b \text{ min}$) = 1500 Hz.

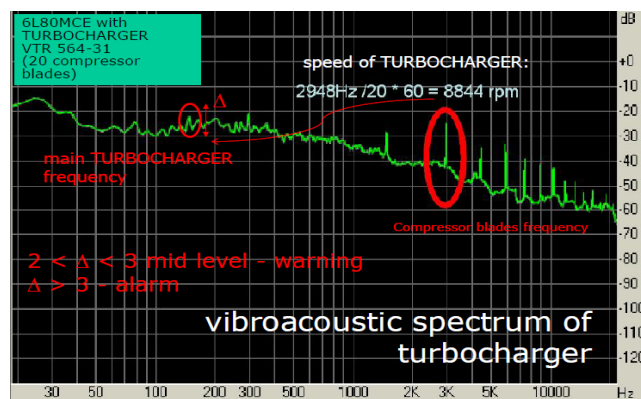


Figure 5. Recording the vibration of turbocharger using the EM-4015-BC electret microphone

By scaling the spectrum diagram (Figure 5) the value of “blades” frequency was estimated as 2948 Hz – it is the closest harmonic to the top limit of 3 kHz. The left harmonic in the diagram (respect to the “blades” harmonic) is the sub-harmonic which has a two times smaller frequency – 1474 Hz.

From the “blades” turbocharger frequency the turbocharger rotor speed was calculated as:

$$\text{RPM turbocharger} = 60 \times 2948 \text{ Hz} / 20 = 8844 \text{ rpm.}$$

The turbocharger standard tachometer was indicating the turbocharger speed as 8800 rpm, so the error of the turbocharger speed estimation is about 0.5 %. It is important to underline: as the error of turbocharger speed estimation by vibroacoustic method is generally less than 1 rpm it provides much more accurate turbocharger speed and further engine operating point estimation.

The frequency of the main harmonic for the turbocharger rotor speed is:

$$\nu_{\text{turbocharger}} = \nu_b / n_b = 2948 \text{ Hz} / 20 = 147,4 \text{ Hz}.$$

Obviously, the relatively high level of the main harmonic amplitude Δ could be an indication of increased level of rotor vibrations [8]. The level of main harmonic amplitude Δ in Figure 5 could be assumed as lightly increased but still permissible.

In all cases of measurements on marine engines, when high levels of fundamental harmonics were found, it was necessary to clean the flow path of the turbochargers. After cleaning, the level of the fundamental harmonic decreased down to $\Delta < 2$.

The set of experiments carried out on the number of MAN MC-series diesel engines has shown that if the main harmonic amplitude becomes 2–3 times greater than the spectrum average level it indicated the dangerous level of turbocharger rotor vibrations [12]. The average spectrum amplitude level was estimated in a range of:

$$[\nu_{\text{turbocharger}} - 50 \text{ Hz} \div \nu_{\text{turbocharger}} + 50 \text{ Hz}].$$

More precise quantitative assessment of the permissible range of turbocharger rotor vibrations level requires further experimental investigations. It is important to accentuate the ability to make such an assessment rapidly during engine normal operation and without any additional devices installation on the engine.

4. Eliminating the “leakage effect” of discrete spectrum (LEE)

In the process of analyzing the discrete spectrum of vibroacoustic signals in order to estimate their frequency and amplitude characteristics, it is necessary to solve the problem of eliminating the effect of “leakage”. This effect is a consequence of the finiteness of the analyzed temporal realization and its discrete representation. The effect of “leakage” or outflow of power from the spectral peaks into the adjacent spectral lines is considered to be one of the main DFT errors [17].

As an example, Figure 6 shows the amplitude spectra of the same sinusoidal signal with an integer (a) and a non-integer (b) number of samples per one signal period.

Let the frequency of a signal be represented by

$$\gamma = M/T,$$

where T is the period of the signal; $M = n + \sigma$, where n is an integer and $0 < \sigma < 1$.

The maximum distortions of the amplitude, frequency and phase of the central harmonica and leakage of power into the neighboring ones will be observed at $\sigma = 0,5$ [17].

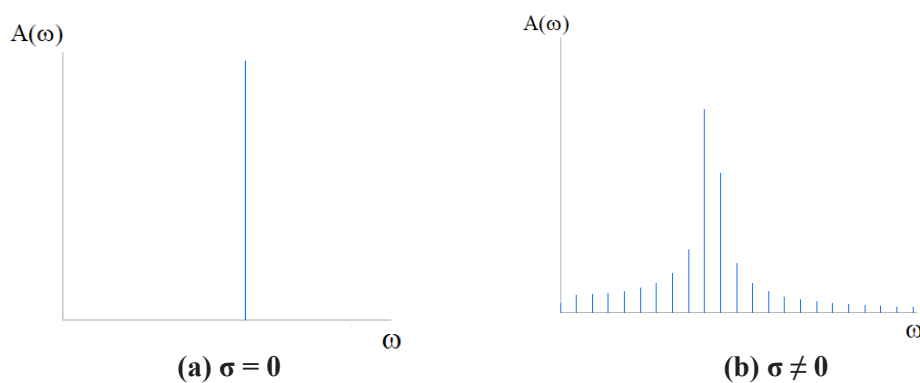


Figure 6. The DFT leakage effect.
Integer (a) and a non-integer (b) number of samples per period

Thus, when analyzing the parameters of the original spectrum signal, i. e. the central harmonic, the resulting amplitude, frequency and phase will be distorted in case of a non-integer number of signal samples per its period. In practice, for discrete recording of signals, an Analog to Digital Converter (ADC) with a selected and fixed sampling rate is used. It is understandable that the number of samples per period will never be an integer and the value of σ will change from 0 to 1 depending on the natural frequency of the measured signal, and the accuracy of estimating the signal parameters along the central harmonic will change.

The most common solution for leakage effect reduction is based on window transform methods. The essence of the method is simple: to reduce the number of discontinuities at the edges in order to reduce leakage it is necessary to reduce the amplitude of the signal near the edges. This scaling is carried out during the implementation of the multiplication by the window with the special form $s_j^w = s_j \cdot W(j)$, where $W(j)$ stands for Window functions, Table 3.

As a result of applying window functions, the spectrum of the original signal is changed and its amplitude decreases by RMS Coeff times, as shown in Table 3. Thus, the dependence of the amplitude of the fundamental harmonic in the spectrum from the value of σ decreases. This means that the fundamental harmonic can be used to approximate the signal parameters with a certain constant error, which can be taken into account.

Table 3

Window functions used to reduce the DFT “leakage effect” [17]		
window	RMS Coeff	equation
Hemming	1,414	$\varpi(n) = 0,53836 - 0,46164 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)$
Hanning	1,633	$\varpi(n) = 0,5 \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)\right)$
Kaiser	1,61	$\varpi(n) = \frac{I_0\left(\beta \sqrt{1 - \left(\frac{2n-N+1}{N-1}\right)^2}\right)}{ I_0(\beta) }$
Blackman-Harris	1,585	$\varpi(n) = 0,42 - 0,5 \cos(2\pi n / (N-1)) + 0,8 \cos(4\pi n / (N-1))$

More precisely, we can eliminate the “leakage effect” by a numerical method based on the processing of the complex DFT results. In [17], a suggestion was made that the frequency m , the phase ϕ , and the amplitude A of the original signal from the values of two maximum harmonics in the spectrum should be specified. For this it is proposed to solve numerically the system of complex equations. To do so, the system of complex equations is proposed to be solved numerically:

$$\left\{ \begin{array}{l} |E(m, \phi)_k / E(m, \phi)_{k+1}| = |X_k / X_{k+1}| \\ \text{Arg}(E(m, \phi)_k) = \text{Arg}(X_k) \end{array} \right\}, \quad (2)$$

where the parameters of the k -th harmonic are specified as: $X_k = \text{Re}_k + j \text{Im}_k$,

$$X_k = NA_k e^{j\phi_k}, A_k = \frac{1}{N} \sqrt{\text{Re}_k^2 + \text{Im}_k^2}, \phi_k = \arctg\left(\frac{\text{Im}_k}{\text{Re}_k}\right) = \text{Arg}(X_k).$$

The harmonic coefficients can be represented in the form: $X_k = (A_k / 2)E(m, \phi)_k$, where $E(m, \phi)_k$ is a complex function independent of the amplitude, but dependent on the frequency and phase:

$$E(m, \phi)_k = e^{j\phi} \frac{e^{2\pi j(m-k)} - 1}{e^{\frac{2\pi j(m-k)}{N}} - 1} + e^{-j\phi} \frac{e^{-2\pi j(m+k)} - 1}{e^{\frac{-2\pi j(m+k)}{N}} - 1}. \quad (3)$$

The system of equations (2) must be solved in the case where the harmonics to the left and right of the central one are not equal to zero (in practice it is more than a given small value δ):

$$X_{k-1} > \delta, X_{k+1} > \delta.$$

If $X_{k-1} = 0, X_{k+1} = 0$, then the leakage effect is absent and the frequency, amplitude and phase of the central harmonica correspond to parameters of the measured initial signal (Figure 6a).

When solving the system (2) for the situation of strong leakage effects ($\sigma \sim 0,5$), only five full iterations were required to provide a specified error of less than 0.5 % in frequency and phase. For a sinusoidal signal, the amplitude and frequency are recovered to the value specified in the original signal with accuracy to 5 decimal places. In this case, the amplitude of the central harmonic in the spectrum after the DFT before the recovery procedure was with an error of 35 % (!) [12; 17].

An error in estimating the frequency of the original signal with respect to the frequency of the central harmonic can also be significant. It depends on the frequency of the ADC and the frequency of the original signal. As the frequency of the ADC increases, it will decrease.

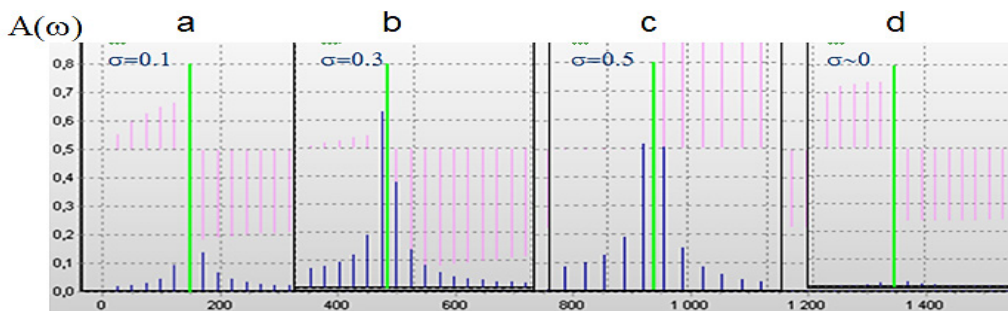


Figure 7. DFT leakage effect eliminating [12; 17]

The solution of the system (2) is not associated with additional memory as is the case for the fast Fourier transform (FFT). Despite the iterative numerical solution for system (2), such procedure only very slightly increases the overall computation time, and make it possible to obtain not only the spectrum of the signal, but also the restored value of the fundamental frequency, amplitude and phase of the measured signal, when it is close to sinusoidal.

This method was investigated in case of noise in the original signal (with a white noise of 5 % and 10 % of the amplitude of the sinusoid). Figure 7 shows the solution

of the system (2) for a sinusoid with an amplitude of 0,8 and for the cases a) $\sigma = 0,1$, b) $\sigma = 0,3$ c) $\sigma = 0,5$ and c) $\sigma = 0$.

The central green line in each Figure 7 a, b, c, d is the main harmonic of a sinusoid with amplitude of 0,8 with the restored amplitude, frequency and phase, being a result of solving the system of equations (2).

For all the cases, not more than 5 complete iterations were required to ensure a given accuracy. As a result of the solution of the system (2), the phase and frequency of the signal with the addition of white noise to 10 %, are restored to the initial value with an error of not more than 0.5 %.

5. Conclusions

The proposed method allows to determine the turbocharger rotor speed and level of the vibration by means of stabilizing harmonics amplitude of vibroacoustic spectrum using proposed algorithm. The method can be implemented in the continuous monitoring system of the turbocharger, Figure 8.

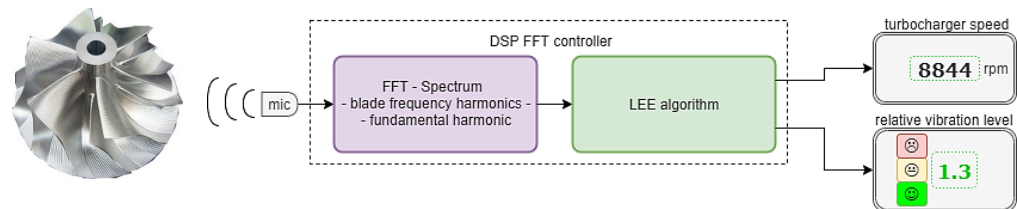


Figure 8. Block diagram of a turbocharger vibroacoustic continuous monitoring system

In accordance with the main directions of increasing the efficiency of vehicles [20], it is relevant to reduce operating costs by eliminating undesirable effects and using more technologically advanced and practical equipment. Tests on two-stroke marine engines have shown that a mobile version of a smartphone-based vibroacoustic measuring system can be realized.

Expected features of the proposed system:

- continuous monitoring of turbocharger rotation speed and rotor vibration level;
- reliability and ease of installation, as the sensor is in a low temperature zone;
- high accuracy rotation speed control, which makes it possible to monitor the total engine load.

In order to define the limits of normal and abnormal rotor vibration levels for various types of turbochargers, further research is necessary. It may be noted that the vibroacoustic spectrum analysis of turbocharger can be quickly made under the operating conditions and does not require significant expenses.

Author Contributions: Conceptualization, R. V. and V. K.; methodology, R. V., O. F. and V. K.; software, R. V., V. K. and D. M.; validation, A. K. and V. Z., writing, review and editing, A. K. and V. K. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Acknowledgments: The authors thank to Odessa National Maritime University and National University of Shipbuilding, Mykolaiv for support.

The authors thank the IMES GmbH company for providing the data sets employed in this work.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

T/C	Turbocharger
MAN MC	This type of MAN engines uses a mechanically driven camshaft for fuel injection, cylinder lubrication, and to control the timing of the starting air and exhaust
MAN ME	Electronically controlled engines
MCR	Maximum continuous rating is defined as the maximum output that an engine is capable to produce continuously under normal conditions
DFT	Discrete Fourier transform
FFT	Fast Fourier transform
LEE	DFT leakage effect eliminating
ADC	Analog to Digital Converter
RMS	Root mean square
IMO	International Maritime Organization

REFERENCES

1. Heywood, B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York; London : McGraw-Hill Education, 2018.
2. MAN B&W S60MC-C8.2-TII Project Guide. Available online: https://marine.man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/printed/S60MC-C8_2.pdf (accessed on 5 November 2020).
3. TCA Turbocharger Project Guide. Available online: <https://turbocharger.mandieselturbo.com/docs/default-source/shopwaredocuments/tca.%20pdf?sfvrsn=2> (accessed on 5 November 2020).
4. Čampara, L., Hasanspahić, N., & Vujicic, S. (2018). Overview of MARPOL ANNEX VI regulations for prevention of air pollution from marine diesel engines. *SHS Web of Conferences*. 58. 01004. 10.1051/shsconf/20185801004.
5. Varbanets, R., & Karianskiy, A. (2012). Marine diesel engine performance analyze. *Journal of Polish CIMAC. Energetic Aspects*. Gdansk: Faculty of Ocean Engineering and Ship Technology Gdansk University of Technology, 7 (1), 269–275.
6. Fomin, O., Lovska, A., Píštěk, V., & Kučera, P. (2019). Dynamic load computational modelling of containers placed on a flat wagon at railroad ferry transportation. *VIBROENGINEERING PROCEDIA 2019*, Greater Noida (Delhi), India, 118–123, doi: 10.21595/vp.2019.21132
7. Fomin, O., Lovska, A., Píštěk, V., & Kučera, P. (2020). Research of stability of containers in the combined trains during transportation by railroad ferry. *MM SCIENCE JOURNAL*, 3728–3733.
8. Solomatin, S. *Foundations of technical diagnostics*. Odessa, ONMU, 2007, 80 p.

9. Pištěk, V., Kučera, P., Fomin, O., & Lovska, A. (2020). Effective Mistuning Identification Method of Integrated Bladed Discs of Marine Engine Turbochargers. *J. Mar. Sci. Eng.* 8, 379.
10. Pištěk, V., Kučera, P., Fomin, O., Lovska, A., & Prokop, A. (2020). Acoustic Identification of Turbocharger Impeller Mistuning – A New Tool for Low Emission Engine Development. *Appl. Sci.*, 10, 6394.
11. Zigelman, E., Skvortzov, D., & Loshinin, I. (2013). Study of Possibility for vibrodiagnostics of medium diesel generators. *Izvestiya vuzov*, 6, 42–48.
12. Varbanets, R., & Kucherenko, Y. (2013). Turbocharged Marine diesel engine frequency parameters monitoring. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine equipment and technology.* 1, 103–110.
13. Kostyukov, V., & Naumenko, A. (2009). Condition monitoring of reciprocating machines. – In: *COMADEM 2009, 22nd Intern. Congress of Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management.* San Sebastian (Spain): Fundacion TEKNIER, 113–120.
14. Naumenko, A. (2009). Real-time condition monitoring of reciprocating machines. In: *The 6th Intern. Conf. on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies.* Dublin (Ireland), 1202–1213.
15. ISO 10816 Series. Mechanical vibration: Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts.
16. EM-4015-BC, Analog Microphone Electret Condenser 1V~10V Omnidirectional (–44 dB ±3 dB @94 dB SPL) Solder Pads. Available online: <https://www.soberton.com/em-4015-bc/> (accessed on 5 November 2020).
17. Otnes, R., & Enochson, L. *Applied Time Series Analysis*, by New York: Wiley, 1978, 428 p.
18. VTR564E32 ABB Turbo Systems. Available online: <https://library.e.abb.com/public/18a4237f8f5b406e9a9a92aa74aeb501/ZTL2104.pdf> (accessed on 5 November 2020).
19. Hanjin Dampier. Available online: https://www.atsb.gov.au/media/24941/mair184_001.pdf (accessed on 5 November 2020).
20. Fomin, O. V. (2015). Increase of the freight wagons ideality degree and prognostication of their evolution stages. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 3, 68–76. <http://nv.nmu.org.ua/index.php/en/monographs-and-innovations/monographs/1078-engcat/archive/2015/contents-no-3-2015/geotechnical-and-mining-mechanical-engineering-machine-building/3040-increase-of-the-freight-wagons-ideality-degree-and-prognostication-of-their-evolution-stages>

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ОСТІЙНОСТІ
ОДНОЯРУСНОГО КОНТЕЙНЕРНОГО ХАУСБОТУ

Г.В. Коновалова¹, О.В. Щедролюсєв², С.В. Терлич³

¹здобувач PhD,

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна
ORCID ID: 0000-0003-1215-849X

²д. т. н., професор, завідувач кафедри «Суднобудування та ремонт суден»,

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова (Херсонський навчально-науковий інститут),
Херсон, Україна

ORCID ID: 0000-0001-7972-3882

³к. т. н., доцент кафедри «Суднобудування та ремонт суден»,

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
(Херсонський навчально-науковий інститут), Херсон, Україна

ORCID ID: 0000-0002-6044-3087

Анотація

Вступ. У зв'язку зі збільшенням популярності будівництва плавучих будинків (хаусботів) виникає необхідність розроблення методик забезпечення їх безпечної експлуатації. Хаусботи, згідно із класифікацією Регістру судноплавства України, належать до стоїчних суден навіть за наявності енергетичної установки. Для безаварійної експлуатації таких плавучих споруд необхідним є забезпечення остійності, враховуючи їх малу осадку у разі відносно великої вітрильності та, як правило, недостатньої надійності якірних та/або швартовних пристроїв. **Метою дослідження** є отримання математичних залежностей для визначення параметрів остійності (центру величини, поперечного та поздовжнього метацентрів для трьохпоплавкового понтону самохідного хаусботу). **Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Теоретичною базою є наукові роботи в галузі проектування та конструювання хаусботів, дебаркадерів, понтонів, нормативно-правова база Регістру судноплавства України, а також дослідження щодо модульного формування та конструктивно-технологічних рішень плавучих та берегових споруд. **Методи дослідження.** Для розрахунку плечей статичної остійності використано два основні методи теорії корабля: рівнооб'ємних нахилень та обертання відносно нерухомої вісі. Спосіб рівнооб'ємних нахилень передбачає проведення допоміжних ватерліній, які наближено відсікають постійний об'єм підводної частини понтону. Недоліком такого методу є необхідність дублюючих обчислень для діючої та допоміжної ватерлінії, у зв'язку із чим виникає можливість накопичення похибок. **Резюме.** Вперше розроблено методичні рекомендації розрахунку остійності плавучих будинків на прикладі одноярусного контейнерного хаусботу. Запропоновані авторами математичні залежності та графічні пояснення до них дозволяють визначити параметри діаграми Ріда для різних розмірів

понтону, його осадки та значень статей навантаження у разі мінімальної кількості вихідних даних.

Ключові слова: плавучі будинки, морехідні якості, остійність.

THE CALCULATION OF STABILITY PARAMETERS OF A LOW-TIER CONTAINER HOUSEBOAT

H.V. Konovalova¹, O.V. Shchedrolosiev², S.V. Terlych³

¹Postgraduate Student,

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-1215-849X

²DSc in Engineering, Professor,

head of the Department “Shipbuilding & Ship Repair”,
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
(Kherson Educational and Scientific Institute), Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-7972-3882

³PhD in Engineering, Associate Professor of the Department, “Shipbuilding & Ship Repair”
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
(Kherson Educational and Scientific Institute), Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-2627-9463

Summary

Introduction. Due to the increasing popularity of the construction of houseboats (houseboats), there is a need to develop methods to ensure their safe operation. Houseboats, according to the classification of the Register of Shipping of Ukraine, are stoic vessels even in the presence of a power plant. For trouble-free operation of such floating structures, it is necessary to ensure stability, given their low draft at relatively high vitality and, as a rule, insufficient reliability of anchor and/or mooring devices. **The aim of the research** is to obtain mathematical dependences for determining the stability parameters (center of buoyancy, transverse and longitudinal metacenters for a three-float pontoon of a self-propelled houseboat). **Analysis of recent research and publications.** The theoretical basis is scientific work in the field of design and construction of houseboats, landing stages, pontoons, regulatory framework of the Register of Shipping of Ukraine, as well as research on modular formation and design and technological solutions of floating and shore structures. **Research methods.** Two basic methods of ship theory have been used to calculate static stability: tilting and rotating relative to a fixed axis. The method of equal-volume inclination involves the conduct of auxiliary waterlines, which approximately cut off the constant volume of the underwater part of the pontoon. The disadvantage of this method is the need for duplicate calculations for the current and auxiliary waterline, which leads to the possibility of accumulating errors. **Resume.** Methodical recommendations for calculating the stability of houseboats on the example of a single-tier container houseboat have been developed. The proposed mathematical dependences and graphical explanations to them allow to determine the parameters of the Reed diagram for different sizes of the pontoon, its draft and values of load articles with a minimum amount of initial data.

Key words: houseboats, seaworthiness, stability.

Вступ. У зв'язку зі збільшенням популярності будівництва плавучих будинків (хаусботів) виникає необхідність розроблення методик забезпечення їхньої безпечної експлуатації [1; 2]. Хаусботи, згідно із класифікацією Регістру судноплавства України [3], належать до стоїчних суден навіть за наявності енергетичної установки. Для безаварійної експлуатації таких плавучих споруд необхідним є забезпечення остійності, з огляду на їх малу осадку у разі відносно великої вітрильності та, як правило, недостатньої надійності якірного та/або швартовного пристроїв [2]. Згідно з термінологією теорії корабля, остійність – це здатність судна зберігати статичну рівновагу як у разі наявності, так і у разі відсутності будь-якої зовнішньої дії (пориву вітру, скупчення людей з одного борту, наявності хвиль тощо) [4]. Остійність хаусботу, експлуатація якого передбачена у прибережних водах, оцінено за критеріями вітростійкості. Як приклад прийнято одноярусний контейнерний хаусбот, ескізний проєкт якого розроблено авторами; його характеристики та 3D-зображення наведено у роботі [1].

Метою дослідження є отримання математичних залежностей для визначення параметрів остійності (центру величини, поперечного та поздовжнього метацентрів для трьохпоплавкового понтону самохідного хаусботу).

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Теоретичною базою є наукові роботи в галузі проєктування та конструювання хаусботів, дебаркадерів, понтонів, нормативно-правова база Регістру судноплавства України, а також дослідження щодо модульного формування та конструктивно-технологічних рішень плавучих та берегових споруд. У дослідженні прийнято до уваги розробки М. В. Савицького та С. Є. Шехоркіної [1], які відображають конструктивні задачі позиціонування хаусботів за допомогою якірних стійок, які водночас контролюють посадку плавучого будинку під час значних приливів та відливів, характерні для нижньої течії Дніпра та Дунаю. Архітектурі та конструюванню плавучих річкових вокзалів та павільйонів присвячено праці С. В. Черданцева [2], М. С. Єленського, Б. В. Іонова, Ю. А. Кочнева, Р. Я. Хігера [4; 5; 6]. Практично відсутні вимоги до морехідності та остійності хаусботів у національних класифікаційних товариствах [3]. Архітектурі малоповерхових будівель на воді присвячено наукові праці І. С. Еконномова, А. В. Панфілової, В. Є. Баришева. В них розглянуті актуальні питання технологій формування плавучих споруд у різних умовах. Питання залізобетонного суднобудування висвітлені у працях М. Г. Слуцького, О. С. Рашковського, О. В. Щедролосоєва, В. М. Коннова, Жукова В. Я., О. М. Поступальського [7; 8]. Також у дослідженні використано результати авторських розробок [9; 10].

Постановка задачі. Критерій вітростійкості характеризується оцінюванням потенційної можливості судна протидіяти зовнішнім вітровим навантаженням, тобто

$$M_{KP} \leq [M] = \nabla \cdot \gamma \cdot l_{\max}, \quad (1)$$

де M_{KP} – момент, що кренить від вітрового навантаження, т·м (розраховується згідно з методами теорії корабля); $[M]$ – максимально допустимий момент, що кренить, т·м (визначається за методиками [3]); ∇ – об'ємна водотоннажність, м³; γ – питома вага заборотної води, т/м³; l_{\max} – максимальне плече діаграми Ріда, м. Максимально допустимий момент $[M]$ визначається за діаграмою динамічної остійності (графік залежності плеча відновлюючого моменту у разі

динамічного крену) за методикою, що описана у роботі [4]. Плече ж статичної остійності може бути розраховане як [3]

$$l_{\theta} = x_c \cdot \cos \theta + (y_c - y_{c_0}) \cdot \sin \theta - a_0 \sin \theta, \quad (2)$$

де значення залежності (2) представлено графічно на рис. 1, а саме x_c – абсциса центру величини, м; θ – кут крену, рад; y_c – фактична ордината центру величини, м; y_{c_0} – ордината центру величини за відсутності крену, м; a_0 – відстань між аплікатою центру величини та центром тяжіння, м.

Методи дослідження. Для розрахунку плечей статичної остійності використано два основні методи теорії корабля: рівнооб’ємних нахилень та обертання відносно нерухомої вісі [4; 5]. Спосіб рівнооб’ємних нахилень передбачає проведення допоміжних ватерліній, які наближено відсікають постійний об’єм підводної частини понтону. Недоліком такого методу є необхідність дублюючих обчислень для діючої та допоміжної ватерлінії, у зв’язку із чим виникає можливість накопичення похибок. Метод обертання навколо нерухомої вісі розглядає нерівнооб’ємні нахилення, за допомогою яких визначається залежність величини плеча статичної остійності від водотоннажності та кута крену, тобто $l_{\theta} = f(\nabla, \theta)$. При цьому для визначення l_{θ} , яке відповідає заданій водотоннажності, необхідно виконувати додаткові обчислення.

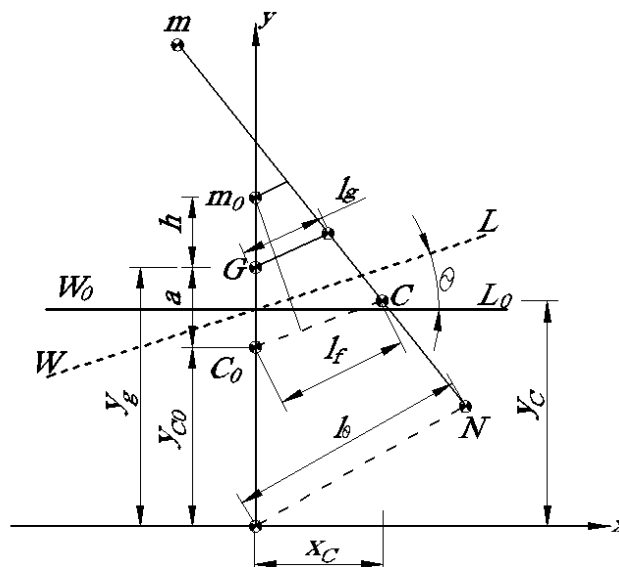


Рис. 1. Схема визначення плеча статичної остійності

Математична модель. Поперечний перетин підводної частини понтону являє собою багатокутник, який створено сімейством графіків прямих у координатній площині ХОУ (площина мідель-шпангоуту) $x = -\frac{B}{2}$ (поз. 1, рис. 1), $y = H$ (поз. 2, рис. 2), $y = 0$ (поз. 3, рис. 2), $x = \frac{B}{2}$ (поз. 4, рис. 2).

Графік ватерліній можна представити у вигляді рівнянь прямої із кутовим коефіцієнтом, які проходять через задану точку (поз. 5, рис. 2).

$$y = T + \operatorname{tg}\theta(x - Y_f), \quad (3)$$

де $\operatorname{tg}\theta$ – кутовий коефіцієнт, який дорівнює тангенсу крену хаусботу; T – осадка понтону, м; Y_f – ордината центру тяжіння ватерлінії (вісі обертання), м.

Центр тяжіння площинної фігури, яка обмежена графіками прямих, можна визначити за залежностями [6]:

$$x_c = \frac{M_y}{S}; \quad y_c = \frac{M_x}{S}, \quad (4)$$

де M_x та M_y – статичні моменти відносно вісей x та y , т·м; S – площа зануреної частини мідель-шпангоуту, м².

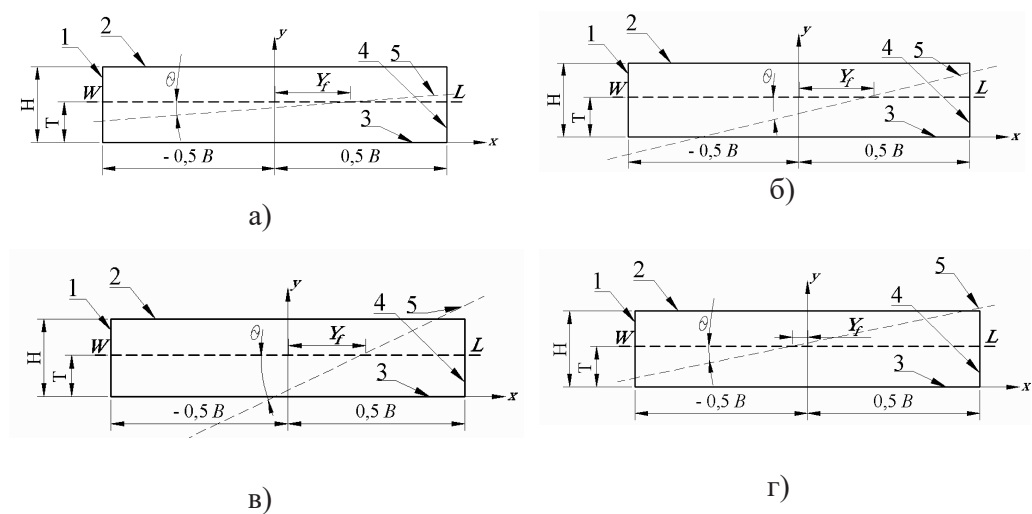


Рис. 2. Розрахункові випадки визначення параметрів остійності хаусботу

Свою чергою статичні моменти та площу поперечного перетину (мідель-шпангоуту) можна визначити методами інтегрального обчислення [7]

$$\begin{aligned} M_x &= \frac{1}{2} \int_a^b [f_2(x)^2 - f_1(x)^2] dx; \\ M_y &= \int_a^b x [f_2(x) - f_1(x)] dx; \\ S &= \int_a^b [f_2(x) - f_1(x)] dx. \end{aligned} \quad (5)$$

де $f_1(x)$ та $f_2(x)$ – прямі, які обмежують площинну фігуру; a та b – межі інтегрування. Точка перетину ватерлінії із верхньою та нижньою межами поперечного перетину понтону можна визначити через тангенс кута крену хаусботу виходячи зі схем, наведених на рис. 2:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{H - T}{\frac{B}{2} + Y_f}, \quad \operatorname{tg}\theta = \frac{T}{\frac{B}{2} + Y_f}. \quad (6)$$

Отримані залежності для визначення статичних моментів та площ поперечного перетину мідель-шпангоуту представлено у табл. 1.

За отриманими залежностями у режимі MathCAD виконано розрахунки параметрів статичної остійності для одноярусного хаусботу контейнерного типу [1], результати яких наведено на рис. 3.

Таблиця 1

Значення статичних моментів та площі мідель-шпангоуту залежно від розташування ватерлінії

Умова	Статичні моменти	Площа перетину
Схема а)		
$\operatorname{tg}\theta \leq \frac{H-T}{\frac{B}{2}+Y_f}$, $\operatorname{tg}\theta \leq \frac{T}{\frac{B}{2}+Y_f}$	$M_x = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} x \cdot [T + \operatorname{tg}\theta(x - Y_f)] dx$; $M_y = \frac{1}{2} \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} [T + \operatorname{tg}\theta(x - Y_f)]^2 dx$.	$S = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} [T + \operatorname{tg}\theta(x - Y_f)] dx$.
Схема б)		
$\operatorname{tg}\theta \leq \frac{H-T}{\frac{B}{2}+Y_f}$, $\operatorname{tg}\theta > \frac{T}{\frac{B}{2}+Y_f}$	$M_x = \int_a^{\frac{B}{2}} x \cdot [T + \operatorname{tg}\theta(x - Y_f)] dx$; $M_y = \frac{1}{2} \int_a^{\frac{B}{2}} [T + \operatorname{tg}\theta(x - Y_f)]^2 dx$.	$S = \int_a^{\frac{B}{2}} [T + \operatorname{tg}\theta(x - Y_f)] dx$.
Схема в)		
$\operatorname{tg}\theta > \frac{H-T}{\frac{B}{2}+Y_f}$, $\operatorname{tg}\theta > \frac{T}{\frac{B}{2}+Y_f}$	$M_x = \frac{1}{2} \left(\int_a^{\frac{B}{2}} [T + \operatorname{tg}\theta(x - Y_f)]^2 dx + \int_b^{\frac{B}{2}} H^2 dx \right)$; $M_y = \int_a^b x \cdot [T + \operatorname{tg}\theta(x - Y_f)] dx + \int_b^{\frac{B}{2}} x \cdot H dx$.	$S = \int_a^b [T + \operatorname{tg}\theta(x - Y_f)] dx + \int_b^{\frac{B}{2}} H dx$.
Схема г)		
$\operatorname{tg}\theta \leq \frac{H-T}{\frac{B}{2}+Y_f}$, $\operatorname{tg}\theta > \frac{T}{\frac{B}{2}+Y_f}$	$M_x = \frac{1}{2} \left(\int_{-\frac{B}{2}}^b [T + \operatorname{tg}\theta(x - Y_f)]^2 dx + \int_b^{\frac{B}{2}} H^2 dx \right)$; $M_y = \int_{-\frac{B}{2}}^b x \cdot [T + \operatorname{tg}\theta(x - Y_f)] dx + \int_b^{\frac{B}{2}} x \cdot H dx$.	$S = \int_{-\frac{B}{2}}^b [T + \operatorname{tg}\theta(x - Y_f)] dx + \int_b^{\frac{B}{2}} H dx$.

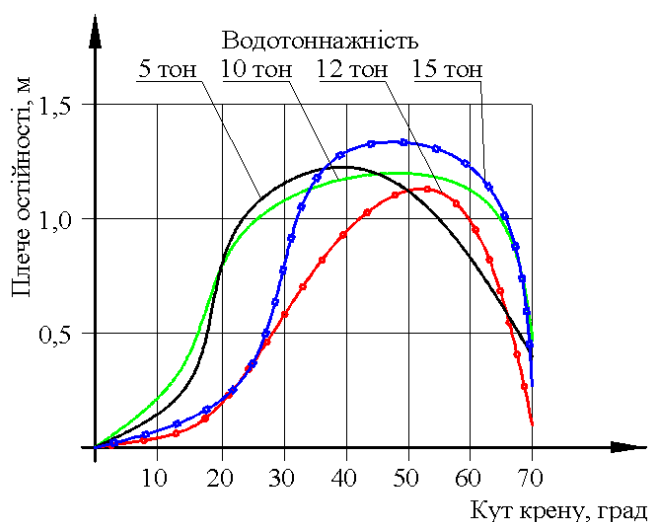


Рис. 3. Залежність плеча остійності від водотоннажності та кута крену

Висновки. Вперше розроблено методичні рекомендації розрахунку остійності плавучих будинків на прикладі одноярусного контейнерного хаусботу. Запропоновані авторами математичні залежності та графічні пояснення до них дозволяють визначити параметри діаграми Ріда для різних розмірів понтону, його осадки та значень статей навантаження за мінімальною кількістю вихідних даних.

ЛІТЕРАТУРА

1. Shekhorkina S. Residential house on floating platform with mooring system of reinforced concrete pillars. *Construction, materials science, mechanical engineering*. No. 81. 2015. P. 229–234.
2. Черданцев С. В., Черданцев Н. В. Плавучесть и остойчивость понтонов в зумпфах угольных разрезов Кузбасса (обзор журнальных статей). *Вестник НЦ ВостНИИ*. № 2. 2018. С. 52–65.
3. Правила класифікації суден внутрішнього плавання. Том 3. Київ. РСУ. 2019. 535 с.
4. Кочнев Ю. А. Диаграмма статической остойчивости судна, находящегося в условиях волнения. *Научные проблемы водного транспорта*. № 66 (1). 2021. С. 36–42. URL: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.159>
5. Будущее строительства: футуристические самообеспечивающиеся плавучие города-небоскребы. URL: <http://ibud.ua/ru/novost/budushcheestroitelstvafuturisticheskiesamoobespechivayushcheesya-plavuchiegorodaneboskreb-foto-8868>
6. Шехоркина С. Е., Савицкий Н. В. Конструктивное решение подводной части малоэтажных жилых зданий на воде. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия «Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения»*. 2014. Вып. 77. С. 228–232. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmit_2014_77_43

7. Жуйков В. Я., Ромашко В. Я., Вербицький Є. В. Ефективність розрахунку багатоступінчатого процесу з використанням функцій вільного режиму в середовищі MathLab. *Технічна термодинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність»*. 2009. Ч. 2. С. 78–81.
8. Rashkovskiy S. A., Krupkin V. G., Marshakov V. N. Non-one-dimensional combustion modes of solid homogeneous energetic materials – an overview. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 2021. No. 20(4). Pp. 13–32. DOI: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.2021038575
9. Щедролюєв О. В., Терлич С. В., Коновалова Г. В., Щедролюєв М. О. Дослідження ходових якостей плавучого будинку. Матеріали 10-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування». Херсон. 2019. С. 238–240.
10. Коновалова Г. В., Щедролюєв О. В., Терлич С. В. Сучасні технології транспортування та спуску на воду плавучих будинків. *Експлуатація та реконструкція будівель і споруд* : тези доп. IV міжнар. конф. Одеса. ОДАБА. 2021. С. 86–87.

REFERENCES

1. Shekhorkina, S. (2015). Residential house on floating platform with mooring system of reinforced concrete pillars. *Construction, materials science, mechanical engineering*. No. 81. P. 229–234.
2. Cherdantsev, S. V. & Cherdantsev, N. V. (2018). Buoyancy and stability of pontoons in the sump of coal mines of Kuzbass (review of journal articles) [Plavuchest' i ostoychivost' pontonov v zumpfakh ugol'nykh razrezov Kuzbassa (obzor zhurnal'nykh statey)]. *Collection of NTs VostNII*. No. 2. P. 52–65. [in Russian]
3. Rules for the Classification of Internal Navigation Vessels (2019). Volume 3. Kyiv. Register of Shipping. 535 p. [in Ukrainian]
4. Kochnev, Yu. A. (2021). Diagram of static stability of a ship in waves [Diagramma staticheskoy ostoychivosti sudna nakhodyashchegosya v usloviyakh volneniya]. *Scientific problems of water transport*. No. 66 (1). P. 36–42. Retrieved from: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.159> [in Russian]
5. The future of construction: futuristic self-sustaining floating skyscraper cities [Budushcheye stroitel'stva: futuristicheskiye samoobespechivayushchiyesya plavuchiye goroda-neboskreby]. Retrieved from: <http://ibud.ua/ru/novost/budushcheestroitelstvafuturisticheskiesamoobespechivayushcheesya-plavuchiegorodaneboskreb-foto-8868> [in Russian]
6. Shekhorkina, S. Ye. & Savitsky, N. V. (2014). Constructive solution of the underwater part of low-rise residential buildings on the water [Konstruktivnoye resheniye podvodnoy chasti maloetazhnykh zhilykh

- zdaniy na vode]. *Construction. Materials Science. Mechanical engineering. Series "Innovative technologies of the life cycle of objects of housing and civil, industrial and transport purposes"*. Issue 77. P. 228–232. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmit_2014_77_43 [in Russian]
7. Zhuikov, V. Ya., Romashko, V. Ya. & Verbitskiy, Ye. V. (2009). Effectiveness of the development of a wide-ranging process with the vicarious functions of the virtual mode in the middle of MathLab [Efektyvnist rozrakhunku bahatostupinchatoho protsesu z vykorystannyam funktsiy vilnoho rezhymu v seredovyshchi MathLab]. *Technical thermodynamics. Thematic issue "Power Electronics and Energy Efficiency"*. Part 2. P. 78–81. [in Ukrainian]
 8. Rashkovskiy, S. A., Krupkin, V. G. & Marshakov, V. N. (2021). Non-one-dimensional combustion modes of solid homogeneous energetic materials – an overview. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*. 20 (4): 13–32. DOI: 10.1615/IntJEnergeticMaterial sChemProp.2021038575
 9. Konovalova, G. V., Shchedrolosiev, O. V., Terlych, S. V. & Shchedrolosiev, M. O. (2019). Research of running qualities of a houseboat [Doslidzhennya khodovykh yakostey plavuchoho budynku]. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference "Modern power plants in transport, technologies and equipment for their maintenance". Kherson. P. 238–240. [in Ukrainian]
 10. Konovalova, G. V., Shchedrolosiev, O. V. & Terlych, S. V. Modern technologies of transportation and launching of houseboats [Suchasni tekhnolohiyi transportuvannya ta spusku na vodu plavuchykh budynkiv]. *Operation and reconstruction of buildings and structures: thesis add. IV International conf. Odessa. OSABA*. P. 86–87.

СУПУТНИКОВІ КОМПАСИ У СИСТЕМІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ НАВІГАЦІЇ СУДЕН

О.М. Мельник¹, К.С. Корякін², О.В. Логінов³

¹к. т. н., доцент кафедри судноводіння і морської безпеки,
капітан далекого плавання,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-9886-6069

²старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-2388-645X

³к. т. н., доцент кафедри судноводіння і морської безпеки,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-4540-731X

Анотація

Вступ. *Перевезення вантажів з використанням морського транспорту має надзвичайно довгу історію, яка безперервно продовжується і сьогодні, набуваючи нових особливостей, пов'язаних з технічним розвитком суден, удосконаленням технології перевезення вантажів, інтенсивною трансформацією зовнішнього середовища. Обладнання сучасних морських суден навігаційним устаткуванням, радіообладнанням, рятувальними та протипожежними засобами та пристроями відбувається за певних правил та підлягає строгому нагляду щодо відповідності всім наявним на поточний момент міжнародним вимогам і стандартам з метою забезпечення безпечної практики експлуатації суден, що досягається шляхом належного використання всіх технічних приладів і систем. **Метою цієї роботи** є дослідження характеристик і особливостей застосування електронних засобів супутникової навігації, визначення перспектив використання альтернативних засобів курсовказання, таких як супутникові компаси, їх функціональних можливостей з метою підвищення ефективності процесу судноводіння і забезпечення безаварійної експлуатації суден. **Результати.** У представленій роботі розкриваються практичні та теоретичні аспекти використання систем супутникової навігації, зокрема впровадження таких альтернативних засобів курсовказання, як супутникові компаси. **Висновки.** У ході дослідження встановлено, що характеристики та функціональні можливості супутникових пристроїв курсовказання здатні не тільки підвищити ефективність процесу судноводіння, але й забезпечити безаварійну експлуатацію суден, що додатково підтверджує їх актуальність. Поширене використання супутникових компасів як невід'ємної частини навігаційного обладнання сучасних суден значно спрощує процес судноводіння і дає можливість швидко і точно визначити необхідні параметри руху судна.*

Ключові слова: супутникові компаси, курсовказання, судноводіння.

SATELLITE COMPASSES
IN THE SAFETY CONTROL SYSTEM OF SHIP NAVIGATION

O.M. Melnyk¹, K.S. Koriakin², O.V. Lohinov³

¹PhD in Engineering, associate professor
of Navigation and Maritime Safety department, Sea Captain,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-9886-6069

²Senior Lecturer at the Department of Navigation and Maritime Safety,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-2388-645X

³PhD in Engineering,
associate professor of Navigation and Maritime Safety department,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-4540-731X

Summary

Introduction. Transportation of cargo by sea transport has a very long history, which uninterruptedly continues today, gaining new features associated with the technical development of ships, cargo transportation technology, and intensive transformation of the environment. Modern ships are equipped with navigation, radio equipment and firefighting equipment and devices provided in accordance with certain rules and are subject to strict monitoring for compliance with all current international requirements and standards in order to ensure safe ship operation practices, achieved through the proper use of all technical devices and systems on board. **The purpose** of this work is to investigate the features and characteristics of using electronic means of satellite navigation, identifying the prospects for alternative means of course indication such as satellite compasses, analysis of their functional capabilities with the purpose of increasing the efficiency of ship navigation and ensuring failure-free operation of vessels. **Results.** This paper discloses practical and theoretical aspects of using satellite navigation systems, including the implementation of alternative devices such as satellite compasses. **Conclusions.** The article reveals that the characteristics and functional capabilities of the satellite course indication devices are able not only to increase the efficiency of ship navigation but also to provide trouble-free operation of ships, which additionally confirms their relevance and outlines perspectives of satellite compasses as an integral part of the navigation equipment of modern ships, which significantly simplifies the process of ship navigation and makes it possible to quickly and accurately determine the necessary parameters of the ship's motion.

Key words: satellite compasses, heading, ship navigation.

Постановка проблеми. Забезпечення безпеки процесу судноводіння та вирішення завдань навігації на сучасних суднах досягається шляхом використання технічних засобів та навігаційного обладнання, якими укомплектовано кожне судно відповідно до правила 19 глави V Конвенції СОЛАС-74. Завдяки саме сучасним технологіям та процесам автоматизації передові системи навігаційного обладнання здатні надавати поточні дані та інформацію про рейс. Як приклад, сучасні системи онлайн-моніторингу суден дозволяють судновласникам здійснювати

спостереження за власним флотом, отримуючи інформацію про конкретні судна в режимі реального часу, не чекаючи на отримання щоденних звітів. Оператори та судновласники мають змогу не лише отримувати онлайн-інформацію про рейс судна та його географічне положення на карті, табличне представлення основних технічних параметрів суден.

Альтернативні засоби визначення напрямку руху об'єктів, такі як супутникові компаси, забезпечують високоточну інформацію про орієнтацію і курсовказання для навігаційного обладнання, такого як радар, картплотери та авторульові. Вони призначені для оброблення інформації про параметри орієнтації та навігації морських суден у режимі корекції за даними супутників та в автономному режимі у разі короткочасних перерв у надходженні супутникових сигналів. Компаси можуть використовуватися для широкого спектра програм на будь-якому типі судна, в якому використовуються технології глобального позиціонування. На характеристики роботи супутникового компаса не впливають швидкість судна, широта, геомагнетизм тощо. Тому дослідження, що спрямовані на процеси інтеграції технології GPS, які забезпечують точну та стабільну інформацію про курс судна, є актуальним і важливим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичним та практичним питанням експлуатації електронавігаційних приладів, що встановлюються на сучасних морських судах присвячені праці [1; 6; 7]. У [2; 5] представлено порівняльний аналіз сучасних систем курсовказання морських суден та перспективи використання новітніх систем курсовказання на морському флоті. Функціональні можливості та технічні особливості сучасних супутникових компасів досліджено в [3; 4]. Загальні принципи побудови навігаційних систем, напрями підвищення якості їхньої роботи та використання супутникових навігаційних систем для оцінки повного кута дрейфу судна в обмежених зонах розглянуті у [8–10]. У [11–13] досліджено оцінку потенційного негативного впливу системи факторів на експлуатаційний стан судна та актуальні проблеми безпеки міжнародного судноплавства. У результаті огляду останніх досліджень та публікацій дійшли висновку щодо необхідності вивчення принципів функціонування та особливостей використання супутникових компасів.

Виклад основного матеріалу. Суднові системи курсовказання призначені для визначення напрямку руху судна. Для вирішення цього завдання в процесі судноводіння використовуються компаси різних типів: магнітний, гіроскопічний або супутниковий, що вказують напрямки на відповідні полюси. На відміну від магнітного компаса, на гірокомпас, як механічний прилад, не впливає зовнішнє магнітне поле Землі, він використовується для визначення істинного географічного меридіану, а його ретрансляторна система також встановлена на рульовій платформі для забезпечення аварійного керування. За компасом призначається та утримується курс судна, беруться пеленги на берегові орієнтири, визначаються курсові кути, напрям вітру та течії. Компас використовується в умовах морського плавання, на великих озерах, річках та водосховищах. Як головне, без компасу неможливо утримувати правильний напрямок руху судна в умовах поганої видимості (туман, снігопад тощо) та в умовах втрати видимості берегових орієнтирів.

Аналізуючи дані страхових компаній за окреме п'ятиріччя з 2011 по 2016 рік, встановлено, що аварії, спричинені людським фактором, становлять понад 75 відсотків,

але не менш істотною причиною разом з пожежами є незадовільний технічний стан та відмова обладнання і механізмів. У даних за 2021 рік у переліку причин аварійності світового флоту ця позиція посіла четверте місце. Тому одним із заходів забезпечення надійної роботи складних систем та приладів навігаційного містка є їх дублювання, що у разі відмови передбачає безперебійне забезпечення процесів керування судном. Також, без сумніву, слід враховувати ймовірність виникнення помилок від неправильних дій екіпажу або людського елемента.



Рис. 1. Основні причини претензій за даними страхових компаній (за даними Глобального центру ризиків Allianz)

Аналіз більшості аварій вказує на те, що належні дії щодо вчасного виявлення та виправлення помилок могли б запобігти виникненню аварій. Тому, порівнюючи випадки відмови найважливішого або критичного обладнання і механізмів з помилками внаслідок людського фактора, можна стверджувати, що в обох випадках дублювання запобігло б небажаним наслідкам.

Останнім часом з розвитком сучасних технологій усе більшого поширення набувають системи супутникового курсовказання. Середньо-орбітальні навігаційні супутникові системи дозволяють отримувати інформацію не тільки про координати і складники шляхової швидкості судна, але також здійснювати його курсовказання. З цією метою використовуються двох-, трьох- або чотирьохантенні системи. Великою мірою для отримання значення поточного курсу судна необхідно мати тільки дві антени. Третя антена дозволяє разом з курсом судна визначити кути кільової і бортової хитавиці та поліпшувати точність вимірювання курсу, зменшуючи негативний вплив як хитавиці, так і рискання судна. Зображення трьохантенної системи представлено на рис. 2.

Розуміння принципу визначення курсу судна за допомогою даних GPS запропоноване у [7] на прикладі використання двох антен A1, A2, розташованих у діаметральній площині судна на відстані b , що становить у реальних супутникових датчиків курсу близько 85 см (рис. 3).

Передача сигналів навігаційними штучними супутниками Землі (НШСЗ) у системі GPS виконується на двох частотах: $F1 = 1575,42$ і $F2 = 1227,60$ МГц. Бортова апаратура GPS для цивільних суден використовує тільки загальнодоступний C/A-код, яким модулюється частота $F1$. Довжина хвилі цієї несучої частоти становить приблизно 19 см. За позиційними визначеннями координат судна

і по ефемеридах супутників завжди можуть бути розраховані горизонтні координати НШСЗ: висота h_s і азимут A_s . На рис. 3 ці координати вказані для одного із супутників. Відстані, які проходить сигнал з певного супутника до антен A_1, A_2 , відрізняються на величину D . Цю різницю відстаней можна знайти, вимірявши величину зсуву фаз несучого сигналу, що приймається антенами. Втім фазовим вимірюванням властива багатозначність, тому вимірюється тільки його дрібна система, а число циклів має бути визначено за допомогою додаткових даних. Тому, маючи значення відстані D і висоти супутника h_s над істинним горизонтом, можна знайти курсовий кут q_s супутника і істинний курс судна K :

$$A_2 F = \Delta D \cos h_s; q_s = \arccos \frac{A_2 F}{b}; K = A_s - q_s. \quad (1)$$

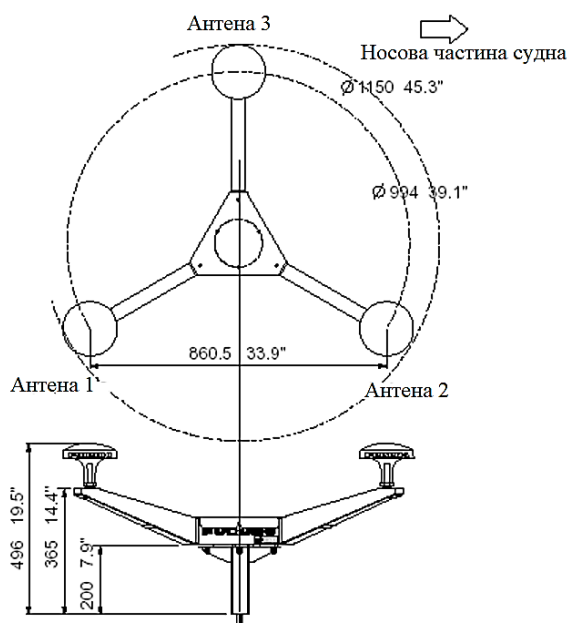


Рис. 2. Габаритні розміри антенної системи супутникового компаса

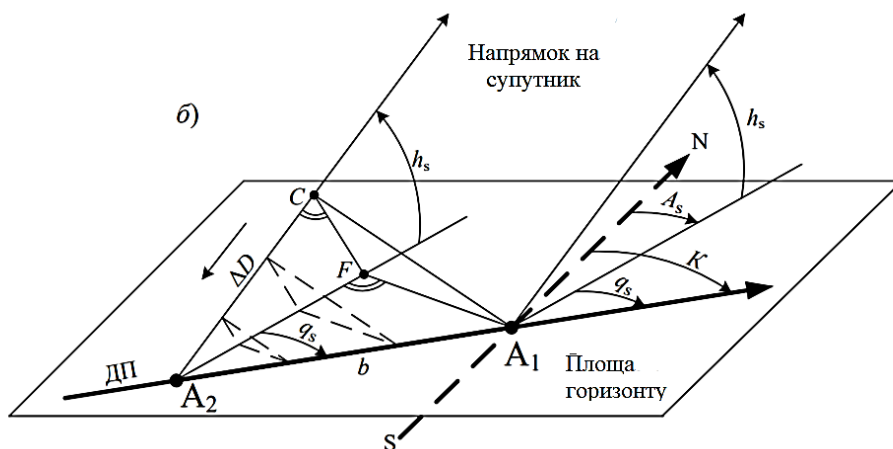


Рис. 3. Горизонтні координати для одного супутника [7]

Значення курсу судна визначаються за всіма супутниками, що знаходяться над горизонтом, і осереднюються [6]. Для обчислення координат судна за навігаційними сигналами супутників GPS (система глобального позиціонування) в тривимірному просторі необхідно виміряти дистанції не менше ніж до 4, а у разі двовірної навігації – не менше ніж до 3 супутників. Для отримання додаткових координат істинного курсу судна число супутників, до яких вимірюються відстані, має бути на один більше, позаяк кількість зумовлених параметрів збільшується на одиницю. Крім координат і постійної похибки відстані, тут потрібно також знайти значення цілого числа циклів n [4].

На рис. 4 представлений зв'язок між координатами антен першого і другого прийомоіндикаторів з істинним курсом (ІК) судна [13].

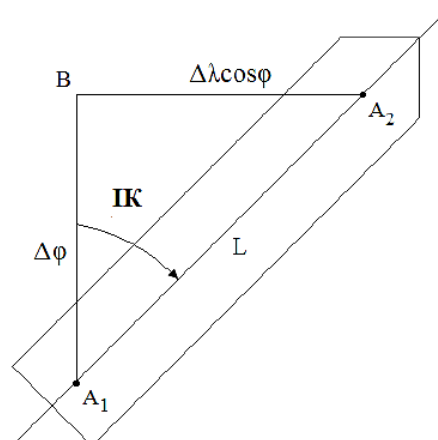


Рис. 4. Зв'язок координат двох супутникових антен A_1 і A_2 , розташованих у діаметральній площині судна

Використовуючи чотири окремі антени ГНСС (глобальної навігаційної супутникової системи) для максимальної швидкості відгуку, супутниковий компас удосконалює новітні стандарти надійності і точності курсовказання серед наявних засобів морської навігації.

Традиційно супутникові компаси розраховують курс, використовуючи одну вихідну лінію між двома антенами; чотири антени можуть розраховувати інформацію про значення курсу, використовуючи будь-яку з шести вихідних ліній, прокладених між чотирма антенами. Безпрецедентна конструкція чотирьохантенної системи дозволяє також обчислювати надзвичайно точну інформацію про курс, кути поздовжнього і поперечного нахилу, що є ідеальним рішенням для складних судових приладів, де іноді може бути утруднений доступ та огляд супутників (рис. 5).

До стандартної комплектації супутникового компасу входить три антени, розміщені на жорсткій платформі, що повинні бути встановлені з високою точністю, основний модуль та пристрій управління і відображення. Лінія, що з'єднує антени цих приймачів, є опорною для визначення курсу судна через координати, отримані з кожного з цих приймачів. Систематична похибка координат кожного з цих приймачів не робить впливу на точність визначення опорного напрямку і, як наслідок,

на точність курсовказання. Використання фактично різницевого методу дозволяє виключити погрішності швидкості поширення радіохвилі, похибки вимірювання елементів орбіти та інші систематичні похибки. Збільшення відстані між антенами дозволяє збільшити точність компаса. На практиці базова відстань між антенами перебуває в діапазоні від 0,8 до 4 метрів [13].

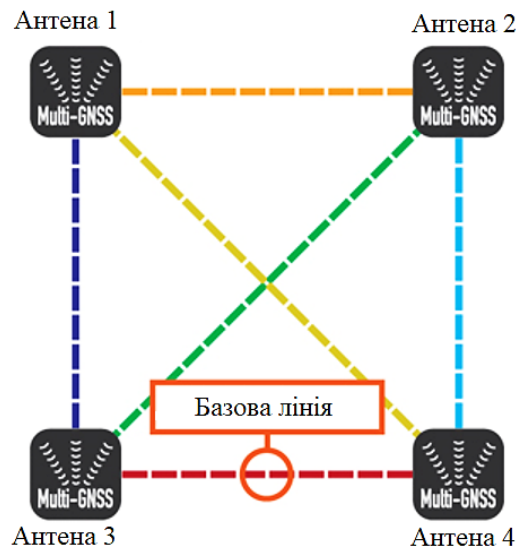


Рис. 5. Чотирьохантенна система позиціонування

В основному модулі розташовуються приймач GPS, вільний гіроскоп, процесор. Як зазначено вище, супутниковий компас представляє інформацію про координати судна, курс, шляхові кути, кутову швидкість, кути бортової і кільової хитавиці. По суті він є датчиком параметрів кінематичного стану судна.

Такий курсовказівник може відображати дані в трьох формах, призначених для таких завдань:

- керування судном (курс, рухома картушка з нерухомим індексом курсу, шляхова швидкість, шляховий кут, кути кільової і бортової хитавиці);
- представлення навігаційної інформації (дата, час, координати місця судна, шляхова швидкість і шляховий кут);
- вказання напрямку діаметральної площині судна (дата, час, курс, шляхова швидкість і шляховий кут).

Додатково супутниковий компас здатний передавати інформацію про курс судна в такі пристрої, як РЛС (радіолокаційна станція), ЗАРП (засоби автоматичної радіолокаційної прокладки), авторульовий, АІС (автоматична ідентифікаційна система), ЕКНІС (електронна картографічна система) та в іншу апаратуру.

Супутниковий компас, як правило, має такі базові характеристики, як:

- середня квадратична похибка (СКП) показань курсу – ± 0.50 град.;
- СКП показань кута бортової (кільової) хитавиці – ± 0.50 град.;
- точне стеження за курсом у разі швидкості повороту – до 25 град./с;
- час приходу в готовність після включення – 4 хв;
- 95 % похибка визначення місця судна по GPS – ± 10 м;

– 95 % похибка визначення місця судна по DGPS – ± 5 м.

До особливих переваг супутникових компасів можна віднести те, що компас не потребує технічного обслуговування, висока точність курсу 0,4 град. ідеально підходить для невеликих і середніх за розміром суден. Отримання максимальної точності дозволяється за рахунок використання таких ГНСС, як Галілео і ГЛОНАСС, тому завдяки прийому сигналів від супутників різного типу виключається проблема відсутності сигналу через недостатню кількість супутників. Швидка ініціалізація усього протягом 90 с та зручне підключення до наявної суднової мережі через Ethernet (технологія організації локальних мереж). Також необхідно відзначити високу швидкість стеження 40 град./с, що в два рази перевищує значення згідно з вимогами для високошвидкісних суден, високоточні дані впливу бортової та кільової хитами в аналоговому і цифровому форматах для стабілізаторів та гідролокаторів, контроль швидкості переміщення носової і кормової частини судна для здійснення безпечного швартування.

Щодо головних недоліків супутникових компасів, то сюди можна віднести його неавтономність, тобто залежність від сигналів, прийнятих із супутників системи ГНСС. Додатково треба зауважити, що супутниковий компас поки не є конвенційним приладом, тому необов'язковий для встановлення на морських суднах, проте він знаходить усе більш широке застосування. Також у загальному випадку показання супутникового компасу менш точні, ніж у гіроскопічного, але більш достовірні і не такою мірою схильні до факторів зовнішнього середовища, характеристик судна і процесів обробки кінематичних даних.

Висновки. З огляду на вищезазначені переваги, характеристики та функціональні можливості таких пристроїв необхідно зауважити, що супутникові компаси в майбутньому будуть невід'ємною частиною навігаційного обладнання сучасних суден. Вони значно спрощують забезпечення процесу судноводіння і дають можливість швидко і точно визначити необхідні параметри руху судна. Однак важливо пам'ятати, що впровадження новітніх технічних засобів відволікає увагу судноводія від процесу підтримки постійного рівня безпеки, тому завдання, що потребують рішення, – це забезпечення належного рівня взаємодії судноводіїв та ресурсів навігаційного містка, системи управління безпекою та помилками. Розроблення комплексного підходу у системі підготовки фахівців з метою мінімізації ризиків та впливу людського фактора на безпеку мореплавства є також важливим кроком в умовах використання сучасної техніки та комп'ютеризації в процесах керування рухом судна.

ЛІТЕРАТУРА

1. Технические средства судовождения. Т. 2. Конструкция и эксплуатация / Смирнов Е. Л., Яловенко А. В., Перфильев В. К. и др. Санкт-Петербург, 2000. 656 с.
2. Подпорін С. А. Сравнительный анализ современных систем курсоуказания морских судов. СевНТУ, 2009. 12 с.
3. FURUNO Operator's manual. Супутниковий компас модель SC-70. URL: <https://www.nav-tech-msk.ru/index.php?productID=1102> (дата звернення: 26.12.21).

4. SATELLITE COMPASS ModelSCX-21. URL: <https://www.furuno.com/en/products/compass/SCX-21> (дата звернення: 26.12.21).
5. Жерлаков А. В., Маринич А. Н., Устинов Ю. М. Перспективы использования новых систем курсоуказания на морском флоте. *Эксплуатация морского транспорта*. 2006. № 2. С. 28–31.
6. Вагущенко Л. Л. Современные информационные технологии в судовой электронике : электронное учебное пособие. Одесса, 2013. 135 с.
7. Чапчай П. А. Технические средства судовождения : учебное пособие. Одесса, 2019. 298 с.
8. Dobryakova L., Lemieszewski L., Luszniakov E., Ochinnikov E. The application of satellite compass for GNSS-spoofing detecting. *Zeszyty Naukowe, Maritime University of Szczecin*. 2014. No. 37. С. 28–33.
9. Сурков В. О. Общие принципы построения навигационных систем и направления повышения качества их работы. *Молодой ученый*. 2014. № 9 (68). С. 211–214. URL: <https://moluch.ru/archive/68/11680/> (дата звернення: 11.01.2021).
10. Jurdzinski M. Wykorzystanie systemów nawigacji satelitarnej do oceny całkowitego kąta znosu statku w rejonach ograniczonych. *2 Sympozjum "Nawigacja zintegrowana"*, Szczecin. 2000. С. 151–157.
11. Onyshchenko S., Shibaev O., Melnyk O. Assessment of potential negative impact of the system of factors on the ship's operational condition during transportation of oversized and heavy cargoes. *Transactions on Maritime Science*. 2021. No. 10 (1). DOI: 10.7225/toms.v10.n01.009
12. Melnyk O., Onyshchenko S., Koryakin K. Nature and origin of major security concerns and potential threats to the shipping industry. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series "Transport"*. 2021. No. 113, pp. 145–153. ISSN: 0209-3324. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2021.113.11>
13. Мельник О. М., Щербина О. В., Корякин К. С., Бурлаченко Д. А. Огляд та перспективи використання сучасних систем курсоуказання на морських суднах для забезпечення навігаційної безпеки. *Наукові вісті Дніпровського університету*. 2021. № 21. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21>

REFERENCES

1. Smyrnov, E. L. (2000). Technical means of navigation. Vol. 2. Design and operation [Tekhnichni zasoby sudnovodinnia. T. 2. Konstruktsiia i ekspluatatsiia]. Sankt-Peterburg. [in Russian]
2. Podporin, S. A. (2009). Comparative analysis of modern ship heading systems [Sravnitelnyi analiz sovremennykh system kursoukazaniya morskikh sudov]. SevNTU. [in Russian]
3. FURUNO Operators manual. Suputnykovyi kompas model SC-70. Retrieved from: <https://www.nav-tech-msk.ru/index.php?productID=1102>
4. SATELLITE COMPASS ModelSCX-21. Retrieved from: <https://www.furuno.com/en/products/compass/SCX-21>

5. Zherlakov, A. V. (2006). Prospects for the use of new directional guidance systems in the maritime fleet [Perspektyvy ispolzovaniya novykh system kursoukazaniya na morskoy flote]. *Operation of maritime transport*. No. 2, 28–31. [in Russian]
6. Vahushchenko, L. L. (2013). Modern Information Technology in Navigation [Sovremennyye informatsyonnyye tekhnolohyy v sudovozhdenyy]. Odesa, ONMA.
7. Chapchai, P. A. (2019). Technical means of navigation [Tekhnicheskiye sredstva sudovozhdeniya]. Odesa.
8. Dobryakova, L. (2014). The application of satellite compass for GNSS-spoofing detecting. *Zeszyty Naukowe, Maritime University of Szczecin*. 37, 28–33.
9. Surkov, V. O. (2014). General principles of navigational systems and directions for improving their performance [Obshchyye pryntsypy postroyeniya navyhatsyonnykh system i napravleniya povysheniya kachestva ikh raboty]. *Young scientist*. 9 (68), 211–214.
10. Jurdzinski, M. (2000). Wykorzystanie systemów nawigacji satelitarnej do oceny całkowitego kąta znosu statku w rejonach ograniczonych. 2 Sympozjum “Nawigacja zintegrowana”, Szczecin. 151–157.
11. Onyshchenko, S., Shibaev, O., Melnyk, O. (2021). Assessment of Potential Negative Impact of the System of Factors on the Ships Operational Condition During Transportation of Oversized and Heavy Cargoes. *Transactions on Maritime Science*. 10 (1). DOI: 10.7225/toms.v10.n01.009
12. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Koryakin, K. (2021). Nature and origin of major security concerns and potential threats to the shipping industry. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 113, 145–153. ISSN: 0209-3324. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2021.113.11>
13. Melnyk, O. M., Shcherbyna, O. V., Koriakin, K. S., Burlachenko, D. A. (2021). Overview and prospects of using modern ship navigation systems for ensuring navigational safety [Ohliad ta perspektyvy vykorystanniya suchasnykh system kursovkazanniya na morskyykh sudnakh dlia zabezpechenniya navihatsiinoi bezpeky]. *Scientific News of the Dahl University*. 21. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21>

**СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ШАТУННИХ ПІДШИПНИКІВ
КОЛІНЧАСТИХ ВАЛІВ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ
ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ**

В.П. Савчук¹, Є.В. Білоусов², Д.О. Зінченко³, М.О. Бойко⁴

¹к. т. н., доцент, завідувач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок,
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-5266-850X

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

³к. т. н., доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок,
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-7333-7347

⁴аспірант, старший викладач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок,
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-4945-2043

Анотація

Вступ. З розвитком нових технологій значно розширилися можливості створення повністю автоматизованих систем діагностування, що особливо необхідно в разі складної обробки сигналів датчиків діагностичної системи. Сучасні конструкції датчиків забезпечують термокомпенсацію, одночасне вимірювання декількох параметрів та відрізняються великою надійністю (набагато вищою, ніж раніше), що полегшує побудову комплексних автоматизованих систем діагностування. **Мета.** Статтю присвячено розробленню прямого безперервного контролю температури підшипників шатунної шийки, що дасть змогу забезпечити більш раннє виявлення порушення режиму змащення обертових підшипників колінчастих валів суднових двигунів внутрішнього згоряння, та моделюванню процесу перегріву нижньої головки шатуна в разі порушення функціонування системи змащення. **Результати.** Запропоновано варіант конструкції датчика температури шатунного підшипника, який, на відміну від способу вимірювання з використанням радіотехнології поверхневої акустичної хвилі (SAW), має активний датчик температури та електрогенеруючий термоелемент. Такий пристрій може працювати в режимі як вимірювання температури, так і сигналізатора критичної температури. У першому варіанті постійно здійснюється передача та реєстрація температури вимірюваного об'єкта, а в другому – активація вихідного сигналу датчика за критичного значення температури підшипника та, відповідно, збільшення температурного градієнта на термоелементі. В останньому варіанті зростання температури об'єкта вимірювання призводить до підвищення електричної потужності термоелектричного елемента та в разі досягнення порогового значення температури здійснюється активація передачі аварійного сигналу модулем бездротової передачі даних до модуля бездротового прийому даних. Для визначення градієнта температур і подальшого конструю-

вання датчика, а також вибору параметрів термоелектричного модуля наведено результати комп'ютерного моделювання процесу нагріву шатунного підшипника на прикладі дизельного двигуна MaK M32C. **Висновки.** Отримані результати системного моделювання вказують на те, що процес зміни температури шатунних підшипників є досить швидким, а тому потребує швидкої реєстрації критичного зростання температури системами безперервного моніторингу. Поставлене завдання можна вирішити шляхом модернізації таких систем дистанційними перетворювачами температури запропонованої конструкції.

Ключові слова: моніторинг, моделювання, підшипник, колінчастий вал, змащення.

THE MONITORING SYSTEM FOR CONNECTING-ROD BEARINGS OF THE MARINE INTERNAL COMBUSTION ENGINE

V.P. Savchuk¹, E.V. Belousov², D.O. Zinchenko³, M.O. Boyko⁴

¹Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Vessel's Power Plants Operation,
Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-5266-850X

²Doctor of Engineering Sciences,
Professor at the Department of Vessel's Power Plants Operation,
Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-8185-8209

³Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor at the Department of Vessel's Power Plants Operation,
Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-7333-7347

⁴Graduate Student, Senior Lecturer at the Department of Vessel's Power Plants Operation,
Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-4945-2043

Summary

Introduction. With the development of new technologies, the possibilities of creating fully automated diagnostic systems have significantly expanded, which is especially necessary in the case of complex signal processing of diagnostic system sensors. Modern sensor designs provide thermal compensation, simultaneous measurement of several parameters and are very reliable (several orders of magnitude higher than before), which facilitates the construction of complex automated diagnostic systems. **Purpose.** This article is devoted to the development of direct continuous temperature control of connecting rod neck bearings, which will provide earlier detection of the vessel combustion-type engines cranks' failure and also to the modeling of the temperature distribution of the lower connecting rod head in case of malfunction of the lubrication system. **Results.** A variant of the of the connecting rod bearing temperature sensor design is proposed, which, in contrast to the method of measurement using surface acoustic wave radio technology, has an active temperature sensor and an power generating thermoelement. Such a device can detect an increase in the temperature of the measured object, which leads to an increase in the temperature gradient on the thermoelement and increase the electrical power of the thermoelectric element when

*the threshold value is reached and activates alarm transmission by the wireless data transmission module to the wireless data reception module. **Conclusions.** The obtained results of system modeling indicate that the process of changing the temperature of connecting-rod bearings is quite fast, which requires rapid registration of temperature rise by continuous monitoring systems. The problem can be solved by retrofitting such systems with remote temperature transducers of the proposed design.*

Key words: monitoring, modeling, bearing, connecting-rod, lubrication.

Вступ та постановка проблеми. Діагностування машин і систем у процесі експлуатації проводиться за допомогою зовнішніх, вбудованих та комплексних (змішаних) систем діагностування. Вбудовані системи параметричного діагностування в низці випадків здійснюють моніторинг і не завжди надають діагностичний висновок про несправності, залишаючи цей висновок технічному персоналу. З розвитком нових технологій та появою нової елементної бази значно розширилися можливості зі створення повністю автоматизованих систем діагностування, що особливо необхідно в разі складної обробки сигналів датчиків діагностичної системи. Вбудовані бортові системи значно полегшують і прискорюють постановку діагнозу, а мініатюризація датчиків та підвищення їхньої надійності дають змогу збільшити їх кількість і забезпечити більшу глибину діагностування. Сучасні конструкції датчиків забезпечують термокомпенсацію, одночасне вимірювання декількох параметрів та відрізняються великою надійністю, що полегшує побудову комплексних автоматизованих систем діагностування (АСД) [1].

У процесі аналізу причин пошкодження підшипників колінчастих валів судових двигунів внутрішнього згоряння (далі – СДВЗ) можна зазначити, що більшість із них виникає внаслідок відхилення режимів роботи підшипників від встановлених виробником. Такі відхилення викликані порушенням правил технічної експлуатації СДВЗ, що є наслідком низької виробничої культури членів машинної команди чи ремонтних бригад, і навіть використанням контрафактних деталей під час операцій технічного обслуговування й ремонту [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для зниження ймовірності виникнення аварій унаслідок відмов підшипників ковзання необхідно виключити режими роботи підшипникових вузлів в умовах, що призводять до відмови [3–4]. Здійснювати контроль усіх показників роботи підшипників ковзання, що характеризують їхні умови експлуатації, неможливо внаслідок складності вимірювального обладнання та установки датчиків, а також з огляду на той факт, що необхідно передавати сигнал від датчиків, які встановлені на вузлі, що обертається, здійснює складну траєкторію руху щодо осі колінчастого вала. Найбільш інформативним показником, який використовується для діагностики стану різних підшипникових вузлів, є температура масла на виході з нього або температура підшипника [5–11].

Нещодавно розроблена технологія пасивного бездротового датчика (PWST) дала змогу компанії «Wartsila» ввести бездротове вимірювання температури [12]. Порівняно з непрямыми вимірами детектора масляного туману прямий безперервний контроль температури підшипника шатунної шийки забезпечує більш раннє виявлення порушення його режиму змащення. Це запобігає серйозним відмовам дорогих деталей двигуна, захищає проти прямих наслідків і дає можливість

уникнути додаткових витрат, пов'язаних із незапланованими вартісними операціями з обслуговування та ремонту.

Принцип роботи цієї системи забезпечує безпосередній вимір температури підшипника нижньої головки шатуна з використанням температурного датчика, встановленого максимально близько (не більше кількох міліметрів) до робочої поверхні підшипника. Ця система моніторингу температури заснована на запатентованій радіотехнології поверхневої акустичної хвилі (SAW), яка, як було доведено, є найнадійнішою технологією бездротового температурного контролю в реальному часі. Пристрій обробки сигналу (SPU) створює імпульс радіохвилі, який поширюється стаціонарною антеною. Вона перетворює радіохвилю на акустичну хвилю та посиляє її до рухомого датчика. Ця акустична хвиля розподіляється вздовж поверхні SAW-чіпа, оснащеного багаторазовими відбивачами, і в такий спосіб дає можливість датчику відобразити імпульси, тимчасова затримка між якими залежить від температури чіпа.

Стаціонарні антени встановлені у блоці двигуна так, що датчики та антени перебувають одне навпроти одного за кожного обертання колінчастого вала двигуна. Сигнал тоді передається через кабель, що проходить через блок SPU, встановлений на двигуні, і звідти до пульта управління, розміщеного в машинному відділенні.

Завдяки бездротовій температурній системі моніторингу можна виміряти температуру в режимі реального часу з високою точністю. Це дає змогу контролювати будь-яке підвищення температури певних підшипників і сигналізації, яка буде включена в цілях, щоб двигун можна було сповільнити або зупинити, перш ніж відхилення від певних режимів призведе до несправності чи аварії.

Недоліком таких систем контролю температури шатунних підшипників є висока чутливість до взаємного розташування датчика та антени, а також необхідність встановлення такої кількості антен, яка відповідає кількості датчиків.

Формулювання цілей статті. Метою проведеного дослідження є розроблення та вивчення параметрів системи прямого безперервного контролю температури підшипників шатунної шийки, що дасть змогу забезпечити швидке виявлення порушення режиму змащення шатунних підшипників СДВЗ.

Виклад основного матеріалу. Для усунення зазначених недоліків нами запропоновано варіант датчика температури шатунного підшипника, який, на відміну від способу вимірювання з використанням радіотехнології поверхневої акустичної хвилі, має активний датчик температури 1 (термопара), а також електрогенеруючий термоелемент 4 (елемент Пельтьє). Конструктивні особливості такого датчика представлено на рисунку 1.

У корпусі датчика встановлений мідний стрижень 2, призначений для передачі тепла від підшипника до кільцевого термоелемента 4 (рис. 1). Додатково на кінці стрижня 2 встановлена вимірювальна термопара 1, сигнал від якої передається до вимірювальної схеми, що розташована в корпусі радіатора 6. Радіатор і корпус датчика розділені термоізолюючою прокладкою 5.

Варіант установки запропонованого датчика представлено на рисунку 2. Датчик 3 встановлюється за допомогою різьби в підготовлений отвір у шатуні. Установка вимірювального кінця датчика здійснюється якомога ближче до

навантаженої зони вкладки шатунного підшипника 4. Для підвищення точності вимірювального пристрою чутливий елемент 1 повинен бути встановлений у термоізоляційну оболонку.

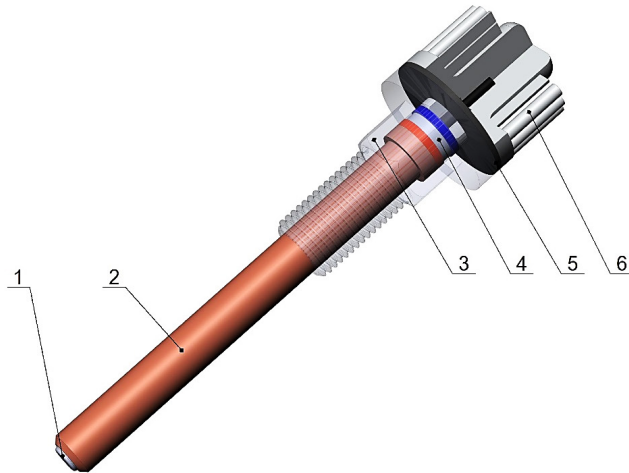


Рис. 1. Конструкція датчика температури з термоелектричним генератором:
1 – термопара; 2 – теплопровід; 3 – корпус датчика; 4 – термоелемент;
5 – прокладка термоізолююча; 6 – радіатор

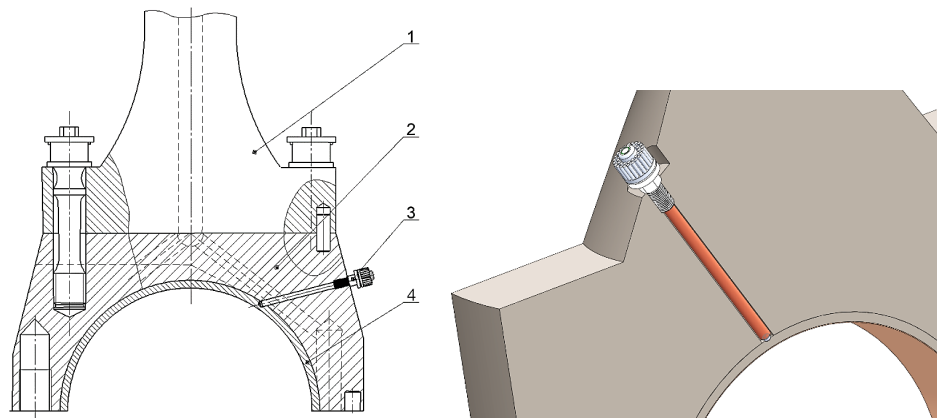


Рис. 2. Варіанти установки бездротового датчика
в корпус шатунного підшипника:

1 – стрижень шатуна; 2 – верхній напівкорпус шатунного підшипника;
3 – датчик температури; 4 – вкладиш

Працює датчик так: у процесі експлуатації тепло, що виділяється в підшипнику, нагріває теплопровідник 2, який передає тепло до термоелектричного модуля 4; інша сторона охолоджується радіатором 6, який відводить тепло в навколишнє середовище (температура в картері малообертового двигуна становить 60...70°C, середньообертового – 90–100 °С), що в нормальних умовах експлуатації забезпечить мінімальну різницю температури на термоелементі в 10–15 °С. Наявність різниці температур на поверхні термоелектричного модуля забезпечує вироблення

в ньому електричного струму. Блок живлення БЖ, до складу якого входить термоелектричний модуль 4, живить операційний підсилювач ОП, аналогово-цифровий перетворювач АЦП та модуль бездротової обробки й передачі сигналу МОС (див. рис. 3). Прийом сигналу здійснюється модулем бездротового прийому даних МПС та здійснює передачу його на ПК або інший спосіб обробки й відображення даних. У разі відсутності можливості генерувати достатню потужність для живлення електронних компонентів передача вихідного сигналу може не здійснюватися або здійснюватися з деякою можливою періодичністю. За досягнення певного градієнта температури вимірювальна система активується та починає передачу безперервного вихідного радіосигналу, показники якого залежать від вимірюваної температури підшипника.

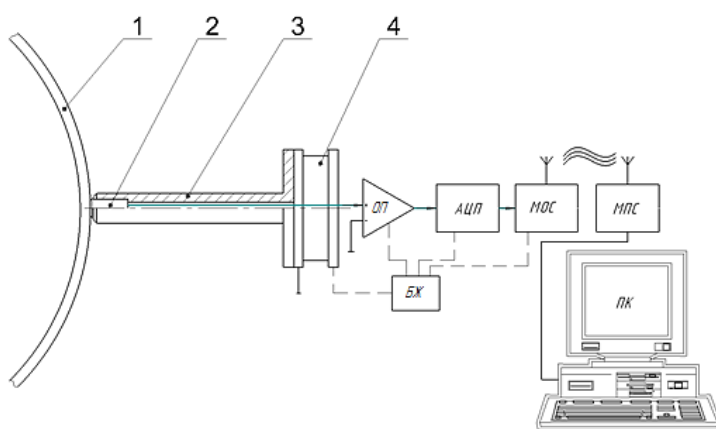


Рис. 3. Схема роботи пристрою для бездротового вимірювання та реєстрації температури шатунних підшипників:

1 – вкладиш підшипника; 2 – термопара; 3 – теплопровід;
4 – термоелектричний модуль; ОП – операційний підсилювач;
БЖ – блок живлення; АЦП – аналого-цифровий перетворювач;
МОС – модуль обробки й передачі сигналу; МПС – модуль приймання сигналу

У спрощеному варіанті прилад, що не вимагає установки чутливого елемента, може працювати як аварійний датчик температури, використовуючи як чутливий елемент тільки термоелектричний модуль. Такий пристрій може фіксувати раптове підвищення температури вимірюваного об'єкта, що призводить до підвищення температурного градієнта на термоелементі й підвищення електричної потужності термоелектричного елемента в разі досягнення порогового значення та активує передачу аварійного сигналу модулем бездротової передачі даних до модуля бездротового прийому даних. Модуль фіксації, обробки та відображення даних надає аварійний сигнал.

Результати моделювання розподілу полів температур нижньої головки шатунна в разі порушення функціонування системи змащення

Дослідження розподілу теплових полів у матеріалах підшипника в разі порушення його працездатності проведемо шляхом моделювання нагріву шатунного підшипника дизеля МаК М32С та його корпусу з використанням САД/САЕ системи SolidWorks. У процесі моделювання застосовувалися такі граничні умови:

- температура навколишнього середовища – 350 К;
- номінальна теплова потужність у підшипнику за умови порушення працездатності – 10 кВт;
- коефіцієнт теплопровідності від сталі до повітря – 7,9 Вт/(м²·К);
- теплова потужність, що надходить від головки шатуна, – 0,25 кВт.

Під час моделювання процесу нагріву підшипникового вузла застосуємо тип розв'язку теплової задачі, що враховує перехідні процеси. Встановлюємо загальний час дослідження – 300 с – та часові проміжки, на яких будуть виводитися результати розрахунку, – 30 с.

Залежність зміни теплової потужності протягом досліджуваного періоду представлено на рисунку 4.

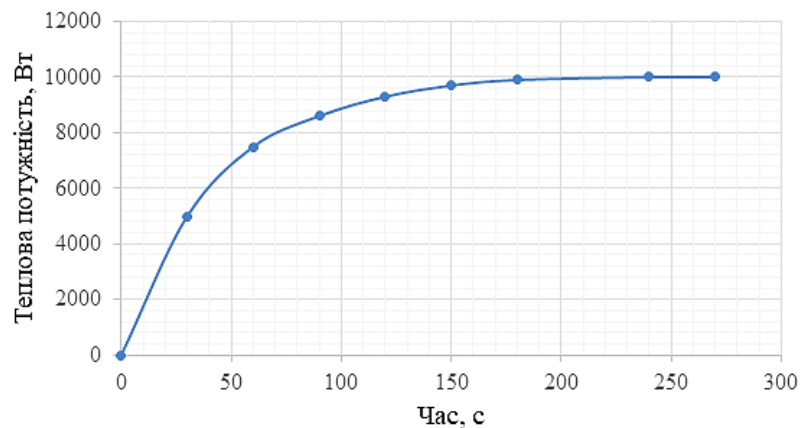


Рис. 4. Залежність зміни теплової потужності, що діє на вкладиш підшипника, за часом

У результаті було отримано епюри розподілу теплового поля в нижній голівці шатуна. На рисунку 5 представлено дані епюри для проміжних результатів розрахунку.

У місці рознімання вкладишів на зовнішній його вершині отримано графічну залежність, що описує зміну температури в цій точці в досліджуваному процесі перегріву вкладиша. Ця залежність представлена на рисунку 6.

Отримані результати свідчать про те, що за вибраної інтенсивності нагріву підшипника температура корпусу нижньої головки шатуна зростає за 5 хв на 100 °С щодо навколишнього середовища. Граничною температурою підшипника, за якої він зможе зберігати свої фізико-механічні властивості, є температура 120 °С (393 К). Таким чином, результати нестационарного теплового моделювання вказують на те, що підшипник досягне критичної температури вже через 1 хв після появи пошкодження.

Наведені результати наочно свідчать про те, що процес зміни температури шатунних підшипників є досить швидким, що потребує швидкої реєстрації росту температури системами безперервного моніторингу. Поставлене завдання можна вирішити шляхом дооснащення таких систем дистанційними перетворювачами температури, що описані вище.

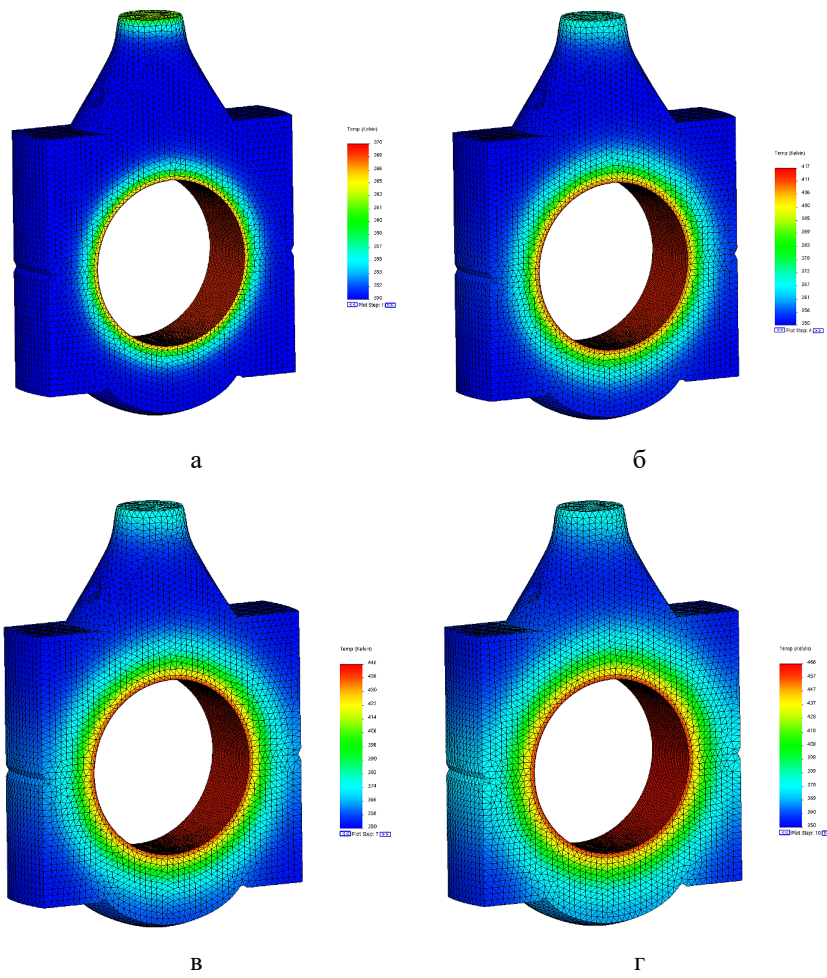


Рис. 5. Епюри розподілу теплових полів для періодів:
а – 30 с; б – 120 с; в – 210 с; г – 300 с

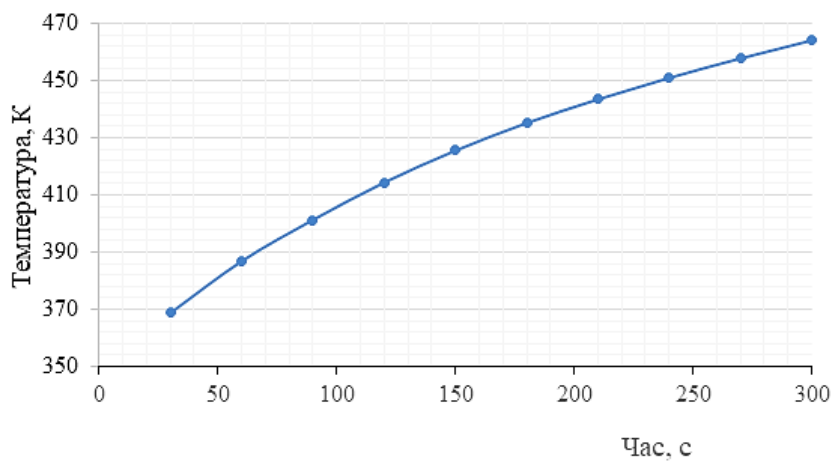


Рисунок 6. Залежність зміни температури вкладиша від теплового впливу на нього

Висновки. У роботі представлено аналіз експлуатаційних показників, що впливають на зміну технічного стану підшипників ковзання колінчастих валів двигунів внутрішнього згорання.

Встановлено, що більшість відмов, які призводять до пошкоджень підшипників ковзання, мають випадковий характер і вимагають встановлення систем контролю за їх робочими показниками.

Запропоновано конструкцію бездротового активного датчика температури, що дає можливість вимірювати температуру шатунних підшипників ковзання, перетворювати та передавати радіосигнал на стаціонарний модуль приймання й обробки сигналу та далі на реєструючий пристрій.

Змодельовано розподіл полів температур нижньої головки шатуна в разі порушення функціонування системи змащення, результати якого вказують на високу швидкість зміни температури шатунних підшипників, що потребує швидкої реєстрації росту температури системами безперервного моніторингу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Marine Engine Room Alarm Monitoring System / I. Tawiah, U. Ashraf, Y. Song, A. Akhtar. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2018. Vol. 9. Iss. 6. DOI: 10.14569/IJACSA.2018.090659
2. Marine Systems and Equipment Prognostics and Health Management: A Systematic Review from Health Condition Monitoring to Maintenance Strategy / Peng Zhang, Zeyu Gao, Lele Cao, Fangyang Dong, Yongjiu Zou, Kai Wang, Yuewen Zhang, Peiting Sun. *Machines*. 2022. Vol. 10. Iss. 2. P. 72–125. URL: <https://doi.org/10.3390/machines10020072>
3. Vencl A., Rac A. Diesel engine crankshaft journal bearings failures: Case study. *Engineering Failure Analysis*. 2014. Vol. 44. P. 217–228. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.05.014>
4. Ligier J.-L., Noel B. Friction Reduction and Reliability for Engines Bearings. *Lubricants*. 2015. Vol. 3. Iss. 3. P. 569–596. DOI: 10.3390/lubricants3030569
5. Thermoelectric effect of wear of alloy bearing / Jun Zhua, Hongliang Gao, Da-neng Pi, Zhong-qing Xie, Lei Mei. *Engineering Failure Analysis*. 2019. Vol. 103. P. 376–383. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.04.030>
6. Townsend J., Affan Badar M., Szekerces J. Updating temperature monitoring on reciprocating compressor connecting rods to improve reliability. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2016. Vol. 19. Iss. 1. P. 566–573. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.09.012>
7. Jia Y., Henaio-Sepulveda J., Toledo-Quinones M. Wireless temperature sensor for bearing health monitoring. *Proceedings volume 5391 "Smart Structures and Materials 2004: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems"* (March 14–18, 2006). San Diego, 2004. DOI: 10.1117/12.539578

8. Biao Wan, Jianguo Yang, Sicong Sun. A Method for Monitoring Lubrication Conditions of Journal Bearings in a Diesel Engine Based on Contact Potential. *Appl. Sci.* 2020. Vol. 10. Iss. 15. P. 5199–5211. DOI: 10.3390/app10155199
9. Henao-Sepulveda J., Toledo-Quinones M., Jia Y. Contactless Monitoring of Ball Bearing Temperature. *2005 IEEE: Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*. 2005. P. 1571–1573. DOI: 10.1109/IMTC.2005.1604416
10. RF-Powered Wireless Sensor Circuits for Temperature Monitoring / J. Henao-Sepulveda, P. Robles-Rodriguez, M. Toledo-Quinones, Y. Jia. *Circuits and Systems. MWSCAS '06. 49th IEEE International Midwest Symposium*. 2006. Vol. 2. P. 628–631.
11. Keogh P., Gomiciaga R., Khonsari M. CFD based design techniques for thermal prediction in a generic two-axial groove hydrodynamic journal bearing. *J. Tribol.* 1997. Vol. 119. P. 428–435. URL: <https://doi.org/10.1115/1.2833511>
12. Radar based sensors – a new technology for real-time, direct temperature monitoring of crank and crosshead bearings of diesels and hazardous media reciprocating compressors / S. Fossen, E. Gemdjian, L. Cornelius, J. Turney. *Proceedings of the thirty-fifth turbomachinery symposium*. 2006. P. 92–107. URL: <https://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/163187/13-FOSSEN.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

REFERENCES

1. Tawiah, I., Ashraf, U., Song, Y., Akhtar, A. (2018). Marine Engine Room Alarm Monitoring System. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 9, iss. 6. DOI: 10.14569/IJACSA.2018.090659 [in English]
2. Peng, Zhang, Zeyu, Gao, Lele, Cao, Fangyang, Dong, Yongjiu, Zou, Kai, Wang, Yuewen, Zhang, Peiting, Sun (2022). Marine Systems and Equipment Prognostics and Health Management: A Systematic Review from Health Condition Monitoring to Maintenance Strategy. *Machines*, vol. 10, iss. 2, pp. 72–125. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/machines10020072> [in English]
3. Vencl, A., Rac, A. (2014). Diesel engine crankshaft journal bearings failures: Case study. *Engineering Failure Analysis*, vol. 44, pp. 217–228. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.05.014> [in English]
4. Ligier, J.-L., Noel, B. (2015). Friction Reduction and Reliability for Engines Bearings. *Lubricants*, vol. 3, iss. 3, pp. 569–596. DOI: 10.3390/lubricants3030569 [in English]
5. Jun, Zhua, Hong-liang, Gao, Da-neng, Pi, Zhong-qing, Xie, Lei, Mei (2019). Thermoelectric effect of wear of alloy bearing. *Engineering Failure Analysis*, vol. 103, pp. 376–383. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.04.030> [in English]

6. Townsend, J., Affan Badar, M., Szekerces, J. (2016). Updating temperature monitoring on reciprocating compressor connecting rods to improve reliability. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 19, iss. 1, pp. 566–573. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.09.012> [in English]
7. Jia, Y., Henao-Sepulveda, J., Toledo-Quinones, M. (2006). Wireless temperature sensor for bearing health monitoring. *Proceedings volume 5391 "Smart Structures and Materials 2004: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems"* (March 14–18, 2006). San Diego. DOI: 10.1117/12.539578 [in English]
8. Biao, Wan, Jianguo, Yang, Sicong, Sun (2020). A Method for Monitoring Lubrication Conditions of Journal Bearings in a Diesel Engine Based on Contact Potential. *Appl. Sci.*, vol. 10, iss. 15, pp. 5199–5211. DOI: 10.3390/app10155199 [in English]
9. Henao-Sepulveda, J., Toledo-Quinones, M., Jia, Y. (2005). Contactless Monitoring of Ball Bearing Temperature. *2005 IEEE: Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, pp. 1571–1573. DOI: 10.1109/IMTC.2005.1604416 [in English]
10. Henao-Sepulveda, J., Robles-Rodriguez, P., Toledo-Quinones, M., Jia, Y. (2006). RF-Powered Wireless Sensor Circuits for Temperature Monitoring. *Circuits and Systems. MWSCAS '06. 49th IEEE International Midwest Symposium*, vol. 2, pp. 628–631. [in English]
11. Keogh, P., Gomiciaga, R., Khonsari, M. (1997). CFD based design techniques for thermal prediction in a generic two-axial groove hydrodynamic journal bearing. *J. Tribol.*, vol. 119, pp. 428–435. Retrieved from: <https://doi.org/10.1115/1.2833511> [in English]
12. Fossen, S., Gemdjian, E., Cornelius, L., Turney, J. (2006). Radar based sensors – a new technology for real-time, direct temperature monitoring of crank and crosshead bearings of diesels and hazardous media reciprocating compressors. *Proceedings of the thirty-fifth turbomachinery symposium*, pp. 92–107. Retrieved from: <https://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/163187/13-FOSSEN.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [in English]

**ПОКРАЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ
СУДНОВОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ТАНКЕРА
ПРОЄКТУ RST27 ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ
ВОДНЕВИХ ПРИСАДОК**

Д.О. Шалапко

к. т. н., доцент кафедри суднового машинобудування та енергетики,
Херсонський навчально-науковий інститут
Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-4311-3908

Анотація

Вступ. З огляду на сучасний стан розвитку техніки подальше збільшення коефіцієнта корисної дії двигунів має незначний ефект, проте використання альтернативних видів палива являє собою можливість збільшити ефективність та екологічність сучасних двигунів. На сьогодні суднові двигуни використовують як паливо HFO («важке паливо»), дизельне паливо та газове паливо. **Мета.** Із застосуванням сучасних технологій використання паливних присадок та альтернативних палив пропонується провести модернізацію паливної системи суднових двигунів танкера проєкту RST27. **Результати.** Пропонується застосовувати систему невеликих добавок водню до основного палива. У результаті використання цієї технології пропонується встановити на судні сучасний електролізер та систему зберігання водню в металогідридному акумуляторі. Проведено моделювання застосування водневих домішок на головному двигуні 6L20 виробництва фірми «Wartsila». Представлено схему розташування обладнання в машинному відділенні та схему паливної системи суднової енергетичної установки. За результатами моделювання ефективна потужність двигуна збільшилася на 3,1 %, а питома ефективна витрата палива зменшилася зі 195 до 191 г/(кВт·год). При цьому немає необхідності у значному переобладнанні як машинного відділення, так і самого головного двигуна. Електрична енергія, яка необхідна для видобутку водню, може бути використана під час часткових режимів роботи дизель-генераторів, на режимі стоянки та під час переходу. **Висновки.** Економічний ефект від упровадження зазначеного науково-технічного рішення отримано за рахунок використання малих домішок водню до основного палива та скорочення витрати палива двигунами енергетичної установки танкера проєкту RST27. За попередніми розрахунками економічний ефект становитиме до 200 доларів США на день, що в перерахунку на один перехід рейсовою лінією Єгипет – Україна становитиме більше 1500 доларів США з урахуванням витрат на водень.

Ключові слова: експлуатація суднової енергетичної установки, двигун внутрішнього згорання, водень, альтернативне паливо, металогідридний акумулятор.

IMPROVING THE TANKER PROJECT RST27 SHIP POWER PLANT
PERFORMANCE BY HYDROGEN ADDITIVES USAGE

D.O. Shalapko

Ph.D., Associate Professor at the Department of Marine Engineering and Energy,
Kherson Educational-Scientific Institute
of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-4311-3908

Summary

Introduction. Given the current state of technology, further increase in engine efficiency has little effect, but the use of alternative fuels is an opportunity to increase the efficiency and environmental friendliness of modern engines. Today, marine engines use HFO (“heavy fuel”), diesel and gaseous fuels as fuel. **Purpose.** Using modern technologies for the use of fuel additives and alternative fuels, it is proposed to modernize the fuel system of marine engines of the tanker project RST27. **Results.** It is proposed to use a system of small additions of hydrogen to the main fuel. As a result of using this technology, it is proposed to install a modern electrolyzer and hydrogen storage system in a metal hydride battery. The application of hydrogen impurities on the 6L20 main engine manufactured by “Wartsila” was simulated. The scheme of equipment location in the engine room and the scheme of the fuel system of the ship’s power plant are presented. According to the simulation results, the effective engine power increased by 3,1 %, and the specific effective fuel consumption decreased from 195 to 191 g/(kWh). At the same time there is no need for significant re-equipment of both the engine room and the main engine. The electrical energy required for hydrogen production can be used during the partial operation of diesel generators, in the parking mode, and during the transition. **Conclusions.** The economic effect of the implementation of this scientific and technical solution is obtained through the use of small impurities of hydrogen to the main fuel and reduce fuel consumption by engines of the power plant of the tanker project RST27. According to preliminary estimates, the economic effect will be up to 200 USD per day, which in terms of one crossing on the Egypt – Ukraine route will be more than 1500 USD taking into account the cost of hydrogen.

Key words: ship power plant operation, internal combustion engine, hydrogen, alternative fuel, metal hydride battery.

Вступ. Майже третина всієї нафти, що видобувається сьогодні, витрачається на транспортну енергетику, тому проблема раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів у світі є дуже актуальною. Обмежені запаси викопних ресурсів зумовлюють приділення уваги можливості використання альтернативних видів палива у транспортних установках (далі – ТУ). Найближчими десятиліттями для малих і середніх ТУ перспективними видами двигунів вважаються дизельні установки та двигуни внутрішнього згорання з примусовим запалюванням. У зв’язку із цим головною проблемою розвитку транспортної енергетики є забезпечення ефективної роботи двигунів, які використовують альтернативне паливо [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В енергетичних комплексах із двигунами внутрішнього згорання можуть використовуватися різні види

альтернативного палива: етиловий і метиловий спирти [2], олії рослинного походження (пальмова, соєва, соняшникова, рапсова) [3], природні та попутні гази, конденсований газ [4], водень [5], синтез-газ (переважно 40–70 % водню та оксиду вуглецю [6]).

Очевидно, що водень є найбільш перспективним альтернативним паливом [4]. Людство має необмежені запаси елемента № 1 періодичної системи Менделєєва. Переобладнання поршневих двигунів на водень є правильним способом усунення парникового ефекту та вирішення проблеми забруднення повітряного басейну планети [5].

З кожним роком інтерес до досліджень у сфері альтернативних видів палива тільки зростає. Здебільшого це відбувається з двох причин: а) швидке скорочення розвіданих ресурсів нафти в результаті активного видобування вуглеводнів (див. рис. 1); б) погіршення екологічної ситуації у світі через постійне збільшення кількості поршневих двигунів, що використовуються в усьому світі.



Рис. 1. Динаміка зростання цін на нафту у світі за 5 років

Використання водню як палива для двигунів внутрішнього згорання є складною проблемою, що включає широкий спектр питань:

- можливість переобладнання сучасних двигунів для роботи на водні;
- вивчення процесу роботи двигунів, що працюють на водні;
- визначення оптимальних способів налагодження робочого процесу для забезпечення мінімальної токсичності та максимального коефіцієнта корисної дії двигуна;
- розроблення системи подачі палива, що забезпечує ефективну організацію робочого процесу в циліндрах двигуна внутрішнього згорання;
- розроблення ефективних методів зберігання водню на борту транспортних засобів.

Однак, попри привабливість розглянутих способів використання палива, не варто забувати також про його недоліки. Варто зазначити, що сьогодні одержання водню є складним завданням та потребує окремих досліджень [2].

Постановка проблеми. Найпростішим способом отримання водню є електроліз води. У результаті одержується суміш водню та кисню. Недоліком цього способу є високі витрати енергії. Отримання 1 м³ водню потребує використання 4 кВт енергії, коли 1 м³ водню може виділити лише 1,8 кВт в паливному елементі з високим рівнем ефективності. Попри це електроліз залишається перспективним напрямом [4].

Окремо вважається, що у випускних газах двигуна з водневим двигуном присутня тільки вода, тому з екологічної позиції такий двигун абсолютно безпечний. Однак водень, хоч і є найбільш екологічно чистим з-поміж відомих видів палива, призводить до значного збільшення викидів оксидів азоту теплового походження у відпрацьованих газах. Таке збільшення є причиною зростання температури циклу та приросту швидкості згорання палива.

Формулювання цілей статті. Із застосуванням сучасних технологій використання паливних присадок та альтернативних палив пропонується провести модернізацію паливної системи суднових двигунів танкера проєкту RST27.

Виклад основного матеріалу. Проведено аналіз ефективності застосування малих домішок водню до основного дизельного палива на дизельній енергетичній установці танкера «SVL LIBERTY» [9] дедвейтом 6970 тон (див. рис. 2). Судно зафрахтоване нафтовою компанією «SVL» та призначене для транспортування сирової нафти портами Чорного, Каспійського і Середземного морів. Силова установка танкера містить два головні двигуна W6L20 (6ЧН20/28) специфікаційною потужністю 1200 кВт виробництва фірми «Wartsila», а також три допоміжні дизельні генератори «Volvo Penta D12 MGKS» потужністю кожного двигуна 292 кВт.



Рис. 2. Загальний вигляд танкера «SVL LIBERTY»

Схема суднової енергетичної установки зазначеного танкера з використанням малих домішок водню наведена на рисунку 3, а на рисунку 4 – загальне розташування машинно-котельного обладнання в машинному відділенні.

Устаткування для електролізу та водню на борту танкера цілком раціонально розміщене в машинному відділенні. За оціночними розрахунками (з використанням електролізера HySTAT®-15-10 [10]) розміри цього обладнання, зібраного в один блок, становлять $1,7 \times 1,85 \times 2,6$ м (див. рис. 4), а маса – близько 1,5 тони.

Двигуни 6L20 (6ЧН20/28) фірми «Wartsila» [8] (див. табл. 1, рис. 5) використовуються в судновій енергетиці як основні та допоміжні двигуни різних типів суден, а також як дизель-генератори наземних електростанцій.

Таблиця 1

Параметри двигуна 6L20

Тип двигуна	Чотиритактний, реверсивний, односторонньої дії, з газотурбінним наддувом, розташування циліндрів – рядне, вертикальне
Модель двигуна	Правильна
Напрямок обертання колінчастого валу під час роботи на передній передачі (з боку вихідного фланця)	За годинниковою стрілкою
Порядок роботи циліндрів	1-3-5-4-2-6
Порядок нумерації циліндрів	Від носа до корми
Діаметр циліндра, мм	200
Хід поршня, мм	280
Кількість циліндрів	6
Наддув	Одноступеневий ізобарний газотурбінний із повітряним охолодженням після компресора
Тип турбокомпресора	TCR-18
Частота обертання к.в./хв ⁻¹	1000

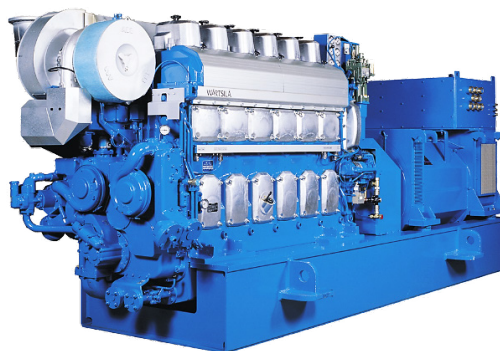


Рис. 5. Загальний вигляд двигуна 6ЧН20/28

На основі уточнених характеристик згоряння палива та показників тепловиділення проведено математичне моделювання робочого процесу двигуна 6L20 за різних значень тиску добавки водню. З огляду на експериментальні дослідження [4] та дані літературних джерел щодо застосування водневих добавок [1–3] значення коефіцієнта надлишку повітря було прийняте як $\alpha = 2,1$, кут випередження впорскування перебуває в межах $\varphi = 12 \pm 1^\circ$ п. к. в.

Зміна ефективних показників двигуна 6L20 показана на рис. 6.

Використання невеликих домішок водню до основного палива приводить до збільшення ефективної потужності з 1313 до 1350 кВт, при цьому зазначена витрата палива зменшується зі 178 до 173 г/(кВт·год) з додаванням 0,11 % домішки водню (за масою). При цьому приріст потужності становитиме 2,8 %, а зниження питомого показника витрати палива – 2,9 %.

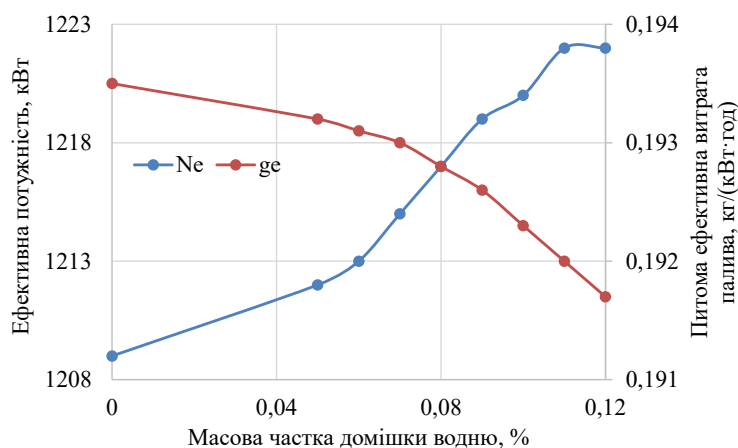


Рис. 6. Ефективні показники роботи двигуна 6L20 за зміни кількості домішки водню

Порівняно з двигуном 1Ч8,6/7,2 [6], де тиск упорскування палива значно нижчий, ніж у двигуна 6L20 (19,5 МПа проти $70,0 \pm 5$ МПа), це зумовлено тим, що ефективність використання малих домішок водню залежить від тиску впорскування, а також від налаштувань системи подачі палива.

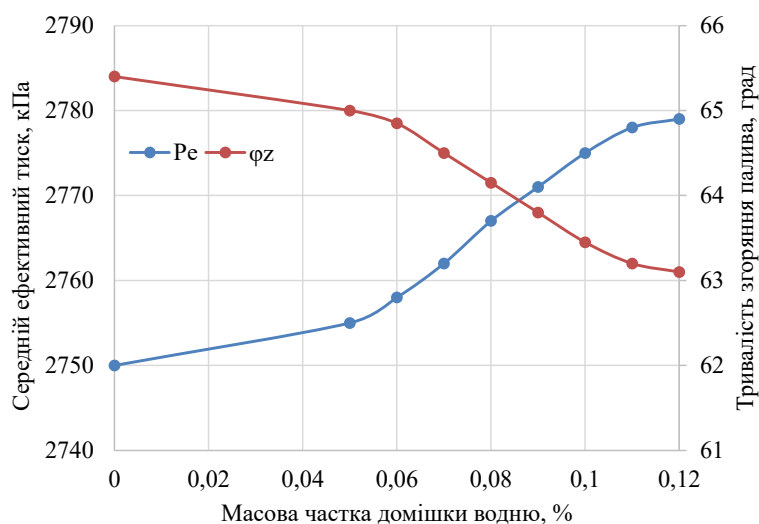


Рис. 7. Залежність середнього ефективного тиску (Pe) та тривалості згоряння палива (φz) від вмісту домішок водню

За значення концентрації домішки водню 0,1 % (за масою) отримано відповідне значення ефективної потужності 1222 кВт, середній ефективний тиск – 2,78 МПа, мінімальна питома ефективна витрата палива – 0,191 кг/(кВт·год).

Найвпливовішими параметрами робочого циклу двигуна під час використання малих домішок водню є тривалість горіння φ_z , кут випередження запалювання $\varphi_{оп}$ та коефіцієнт надлишку повітря α .

Висновки. Нині головний двигун і дизель-генератори судна «SVL LIBERTY» проекту RST27 працюють на дизельному паливі за стандартом ISO8217, категорія ISO-F-DMB та споживають 0,5 т палива на годину, або 12 т на добу, за умови 0,85 Не. За вартості цього палива станом на 1 січня 2022 р. в розмірі 900 доларів США за 1 тону щоденна вартість палива становитиме 10 800 доларів США.

Розрахунки, проведені на основі математичного моделювання з урахуванням експериментальних даних за методикою економічного розрахунку, розробленою в Херсонському навчально-науковому інституті Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, показують, що в разі добавки 0,1 % водню його витрата становитиме 12 кг на добу. Якщо вартість водню, отриманого електролізом, становить 8,96 доларів США за 1 кг, щоденна вартість водню становитиме 108 доларів США.

У разі використання 0,1 % (за масою) домішки водню питома ефективна витрата основного палива зменшується на 3–7 %. Додавання 0,1 % водню до основного палива приведе до зниження витрати палива на ~3 %. З огляду на позитивний ефект від використання малих домішок водню добова витрата палива зменшиться та становитиме 11,64 тони, а вартість палива на добу становитиме 10 476 доларів США. Таким чином, щоденна економія на паливі становитиме 324 долари США на добу. З урахуванням вартості водню загальний економічний ефект становитиме 216 доларів на добу.

У разі транспортування нафти з Єгипту в Україну із середньою довжиною рейсової лінії 1800 миль і середньою швидкістю 10 вузлів економія за використання малих домішок водню становитиме ~1550 доларів США за перехід.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тимошевський Б. Г., Ткач М. Р., Шалапко Д. О. Поліпшення робочих характеристик дизельних двигунів за допомогою додавання водню. *Водний транспорт*. 2016. № 2 (25). С. 24–28.
2. Утилизация теплоты вторичных энергоресурсов судовых малооборотных двигателей, работающих на альтернативном топливе / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С. М. Доценко, Ю. Н. Галынкин, Д. О. Шалапко. *Двигатели внутреннего сгорания*. 2017. № 2. С. 8–13.
3. Тимошевський Б. Г., Ткач М. Р., Шалапко Д. О. Основні положення математичної моделі додавання водню на лінії високого тиску паливної апаратури. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2017. № 3 (62). Т. 1. С. 233–237.

4. Shalapko D. O. An experimental study of the wave effect in fuel equipment using hydrogen additives to diesel fuel. *Technology audit and production reserves*. 2018. Vol. 6. № 1 (44). P. 36–40.
5. Methods to improve the performance of diesel engines by adding hydrogen into high pressure line / M. R. Tkach, B. G. Tymoshevskyy, D. O. Shalapko, A. Yu. Proskurin, O. M. Mitrophanov. *Shipbuilding & marine infrastructure*. 2018. Вип. 1 (9). С. 87–91.
6. Шалапко Д. О. Непрямі методи дослідження ефекту використання малих домішок водню до основного палива. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2018. № 6 (150). С. 44–51.
7. Правила технической эксплуатации морских и речных судов. Дизели. КПД 31.2.002.02-96: нормативный документ морского транспорта Украины. Киев, 1997. 64 с.
8. L20 IMO Tier II – Marine Engines PRODUCT GUIDE. Wartsila, November 2018. 228 p. URL: <https://www.wartsila.com>
9. Танкер проекта RST27: основные характеристики, назначение и техническая документация (2011). *Smart Maritime Group*. URL: <https://smart-maritime.com/ru/reference-list/tankery/proekt-rst27/>
10. HySTAT® HYDROGEN GENERATORS. Oevel, Belgium, 2017. 16 p. URL: <https://www.hydrogenics.com>

REFERENCES

1. Tymoshevskiy, B. H., Tkach, M. R., Shalapko, D. O. (2016). Improving the performance of diesel engines by adding hydrogen [Polipshennia robochykh kharakterystyk dyzelnykh dvyhunyiv za dopomohoiu dodavannia vodniu]. *Vodnyy transport – Water transport*, no. 2 (25), pp. 24–28. [in Ukrainian]
2. Tkach, M. R., Tymoshevskiy, B. G., Dotsenko, S. M., Galynkin, Yu. N., Shalapko, D. O. (2017). Utilization of heat from secondary energy resources of ship low-speed engines operating on alternative fuel [Utilizatsiya teploty vtorichnykh energoresursov sudovykh malooborotnykh dvigateley, rabotayushchikh na al'ternativnom toplive]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya – Internal combustion engines*, no. 2, pp. 8–13. [in Russian]
3. Tymoshevskiy, B. H., Tkach, M. R., Shalapko, D. O. (2017). The main provisions of the mathematical model of hydrogen addition on the high pressure line of fuel equipment [Osnovni polozhennia matematychnoi modeli dodavannia vodniu na linii vysokoho tysku palyvnoi aparatury]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Bulletin of Kherson National Technical University*, no. 3 (62), vol. 1, pp. 233–237. [in Ukrainian]
4. Shalapko, D. O. (2018). An experimental study of the wave effect in fuel equipment using hydrogen additives to diesel fuel. *Technology audit and production reserves*, vol. 6, no. 1(44), pp. 36–40 [in English].

5. Tkach, M. R., Tymoshevskyy, B. G., Shalapko, D. O., Proskurin, A. Yu., Mitrophanov, O. M. (2018). Methods to improve the performance of diesel engines by adding hydrogen into high pressure line. *Shipbuilding & marine infrastructure*, iss. 1 (9), pp. 87–91. [in English]
6. Shalapko, D. O. (2018). Indirect methods of studying the effect of the use of small impurities of hydrogen in the main fuel [Nepriami metody doslidzhennia efektu vykorystannia malykh domishok vodniu do osnovnoho palyva]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya – Aerospace Engineering and Technology*, no. 6 (150), pp. 44–51. [in Ukrainian]
7. Rules for the technical operation of sea and river vessels. Diesels. KPD 31.2.002.02-96: regulatory document of Ukrainian maritime transport [Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii morskikh i rechnykh sudov. Dizeli. KPD 31.2.002.02-96: normativnyy dokument morskogo transporta Ukrainy] (1997). Kyiv, 64 p. [in Russian]
8. L20 IMO Tier II – Marine Engines PRODUCT GUIDE (2018). Wartsila, 228 p. Retrieved from: <https://www.wartsila.com> [in English]
9. Smart Maritime Group (2011). RST27 project tanker: main characteristics, purpose and technical documentation [Tanker proekta RST 27: osnovnye kharakteristiki, naznachenie i tekhnicheskaya dokumentatsiya]. Retrieved from: <https://smart-maritime.com/ru/reference-list/tankery/proekt-rst27/> [in Russian]
10. HySTAT® HYDROGEN GENERATORS (2017). Oevel, Belgium, 16 p. Retrieved from: <https://www.hydrogenics.com> [in English]

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РОЗМІРІВ ПОДОВЖЕННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ СУДЕН У ПРОЦЕСІ ЇХ МОДЕРНІЗАЦІЇ

О.М. Шумило

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

Анотація

Вступ. Світовий круїзний ринок демонструє впевнене зростання. Це спонукає судноплавні компанії розробляти та реалізовувати стратегії щодо збільшення пасажиромісткості флоту, однією з яких є модернізація наявних суден. **Метою** дослідження є створення математичної моделі визначення розмірів і пасажиромісткості шляхом додавання додаткової секції в модельному перерізі судна. **Результати.** У роботі запропоновано вирішення проблеми визначення оптимального розміру додаткової секції, що є складовою частиною модернізації пасажирських лайнерів. Основною метою модернізації є підвищення конкурентоспроможності судноплавної компанії. У зв'язку із цим проведено ретельний аналіз стану круїзного ринку, за результатами якого виявлено сталу динаміку його зростання. Обґрунтовано доцільність модернізації пасажирських суден як засобу оновлення флоту компанії. Визначено показники, що впливають на конкурентоспроможність судноплавної компанії, які пропонується формулювати з огляду на технічні та економічні показники конкретного судна, визначені на етапах проектування й експлуатації. Здійснено оцінку факторів, що характеризують стан та основні тренди розвитку світового пасажирського флоту, кількість перевезених пасажирів, загальну характеристику пасажирського флоту (водотоннажність і пасажиромісткість), усереднену вартість спорудження лайнерів та основні тенденції щодо їх зростання. Розглянуто основні стратегії розвитку круїзних компаній, при цьому особливу увагу приділено модернізації як системному процесу вдосконалення, підвищення ринкової конкурентоздатності круїзних суден шляхом застосування проектно-конструкторських, технологічних і фінансово-економічних заходів та процедур. Проведено комплексну оцінку факторів конкурентоспроможності флоту круїзних компаній, що є підґрунтям для проведення їх модернізації. Ці фактори включають технічні й економічні аспекти, аналіз яких дасть змогу комплексно оцінити напрям здійснення модернізації. У морській індустрії є декілька підходів до модернізації: реновація, переобладнання, модернізація суднової енергетичної установки. У статті розглядається застосування переобладнання зі збільшенням розміру (водотоннажності) шляхом виготовлення та встановлення додаткової секції по мідель-шпангоуту. Визначення оптимальних розмірів (пасажиромісткості) цієї вставки становить основне завдання роботи. Для цього отримано рівняння для визначення ефекту (прибутку) від модернізації, яке прийнято за цільо-

ву функцію. Як обмеження застосовано рівняння щодо вартості модернізації, установки нового обладнання, операційних витрат, міцності корпусу з дотриманням вимог класифікаційних товариств. **Висновки.** У роботі запропоновано модель проведення розмірної модернізації круїзного судна з визначенням довжини додаткової секції за критерієм забезпечення найбільшої прибутковості.

Ключові слова: пасажирські судна, модернізація, додаткова секція, оптимізація, обмеження, критерії.

DETERMINATION OF OPTIMAL SIZES OF EXTENSION OF PASSENGER VESSELS IN THE THEIR MODERNIZATION

O.M. Shumylo

Ph.D., Professor, Vice-Rector for Research,
Associate Professor of Marine Power Plants and Technical Operation,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-0574-1954

Summary

Introduction. The world cruise market is showing steady growth. This encourages shipping companies to develop and implement strategies to increase the passenger capacity of the fleet, one of which is the modernization of existing vessels. The **aim** of the study is to create a mathematical model for determining the size and passenger capacity by adding an additional section in the model section of the ship. **Results.** The paper proposes a solution to the problem of determining the optimal size of the additional section, which is part of the modernization of passenger liners. The main purpose of modernization is to increase the competitiveness of the shipping company. As a result, a thorough analysis of the state of the cruise market was carried out, as a result of which the dynamics of its growth was revealed. The expediency of modernization of passenger ships as a means of renewing the company's fleet is substantiated. The indicators influencing the competitiveness of the shipping company are determined, which are proposed to be formulated based on the technical and economic indicators of a particular vessel, determined at the stages of design and operation. The factors characterizing the state and main trends in the development of the world passenger fleet, the number of transported passengers, the general characteristics of the passenger fleet (tonnage and passenger capacity), the average cost of liner construction and the main trends in their growth. The main strategies for the development of cruise companies are considered, including special attention to modernization as a systemic process of improvement, increasing market competitiveness, cruise ships through the use of design, technological and financial and economic measures and procedures. A comprehensive assessment of the factors of competitiveness of the fleet of cruise companies, which is the basis for their modernization. These factors include technical and economic aspects, the analysis of which will allow a comprehensive assessment of the direction of modernization. There are several approaches to modernization: renovation, re-equipment, modernization of ship power plants in the maritime industry. The article considers the use of re-equipment with increasing size (capacity) – by making and installing an additional section on the middle frame. To do this, we obtained an equation to determine the effect (profit) from

the modernization, which is taken as the target function. The constraints on the cost of modernization, installation of new equipment, operating costs, strength of the case in compliance with the requirements of classification societies are used as restrictions.

Conclusions. The paper proposes a model of dimensional modernization of a cruise ship with the determination of the length of the additional section according to the criterion of ensuring the highest profitability.

Key words: passenger ships, modernization, additional section, optimization, restrictions, criteria.

Вступ. Світовий пасажирський флот на сучасному етапі свого розвитку налічує за різними оцінками чотириста пасажирських суден, які є авангардом міжнародної туристичної індустрії та можуть розміщати на борту орієнтовно 650 тисяч пасажирів із залученням для цього майже 220 тисяч членів екіпажів. Упродовж наступного десятиріччя 36 компаній, які займаються круїзним бізнесом, замовили суднобудівним компаніям ще 118 суден, зокрема океанські лайнери, загальною вартістю 65 млрд дол. США; середній їх дедвейт становить 97 726 тонн, а пасажиромісткість – 2440 пасажирів.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Згідно з даними авторитетного інтернет-порталу [1] та багатьох досліджень [3–6] спостерігається стабільний розвиток круїзної галузі в останні 30 років. Як показано в таблиці 1, простежується стабільний тренд щодо збільшення пасажиропотоку за останні 30 років, що в середньому становило 3,073 млн пасажирів, або 25,085 %.

Таблиця 1

Кількість пасажирських перевезень на круїзних суднах

Роки	Перевезено, млн пасажирів	Зростання	
		абсолютне, млн пасажирів	відносне, %
1990	3,774	–	–
1995	4,721	0,947	20,0
2000	7,214	2,493	34,25
2005	11,180	3,966	35,47
2010	16,30	5,120	31,40
2015	19,377	3,0710	16,80
2020	22,218	2,841	12,78

Це спонукало компанії розробляти та реалізовувати суднобудівну програму, спрямовану на побудову нових суден зі збільшенням водотоннажності й пасажиромісткості, що віддзеркалюється в дослідженнях Всесвітньої круїзної асоціації (Cruise Lines International Association – CLIA) [2] (див. табл. 2).

Зростання круїзної галузі спостерігається на всіх основних ринках Північної Америки, Європи, Південно-Східної Азії (насамперед Китаю та Японії). Ця тенденція з дуже високою ймовірністю зберігатиметься й у майбутньому.

Як показано в таблиці 2, найбільша кількість суден валовою місткістю до 40 тис. GT має середній вік 26 років, 40–69 тис. GT – 19,7 років, 69–93 тис. GT – 13,6 років. До того ж відстежується чітка тенденція спорудження нових суден більшої водотоннажності й пасажиромісткості.

Таблиця 2

Характеристика круїзного флоту

Характеристика лайнерів	Круїзні лайнери місткістю GT (gross tonnage)				
	до 40 тис.	40–69 тис.	69–93 тис.	93–143 тис.	понад 143 тис.
кількість	125	40	74	52	8
середній вік	26	19,7	13,6	7,7	5,6
середня кількість пасажирів	470	1382	2145	3102	4239

Водночас варто підкреслити, що круїзні лайнери є надзвичайно дорогими у виготовленні [1–6]. Їхня орієнтовна усереднена вартість наведена в таблиці 3.

Таблиця 3

Усереднена вартість спорудження пасажирських лайнерів

№ з/п	Пасажиромісткість лайнерів	Середня вартість, млн дол. США
1	до 500	260
2	від 500 до 1000	394
3	від 1000 до 2000	442
4	від 2000 до 3000	555
5	від 3000 до 4000	734
6	від 4000 до 5000	937
7	більше 5000	1310

Для підтвердження викладених даних наведемо п'ятірку найдорожчих суден:

- 1) Allure of the Seas – 1,5 млрд дол. США;
- 2) Oasis of the Seas – 1,4 млрд дол. США;
- 3) Symphony of the Seas – 1,35 млрд дол. США;
- 4) Harmony of the Seas – 1,35 млрд дол. США;
- 5) Norwegian Epic – 1,2 млрд дол. США.

Формування цілей статті. Метою дослідження є створення математичної моделі визначення розмірів і пасажиромісткості судна шляхом додавання додаткової секції в його модельному перерізі.

Виклад основного матеріалу. Для задоволення зростаючого попиту на круїзи судноплавна компанія, з огляду на досить високу конкурентність ринку, повинна виробити стратегію свого розвитку – вибрати з таких варіантів:

- а) побудова нового судна;
- б) придбання вживаного судна;
- в) модернізація власних суден компанії;
- г) оренда суден (фрахт) в інших компаніях.

Вибір кожної стратегії потребує прискіпливого техніко-економічного аналізу з урахуванням оцінки фінансових можливостей компанії та зручності залучення кредитних ресурсів.

Побудова нових суден зумовлюється переважно критерієм економічності з урахуванням зростаючих вимог до рівня безпеки (судноплавства та пасажирів), комфорту, екологічності й енергоефективності.

Високий рівень конкуренції та зростаючий попит змушує судновласників, особливо крупні компанії, зосереджуватися на спорудженні нових лайнерів за індивідуальними проектами, які ґрунтуються на передових технологіях у суднобудуванні й морській інженерії, сфокусовані на задоволенні зростаючого попиту на відповідний рівень комфорту, сервісу, безпеки, цінової політики. З іншого боку, для придбання нових суден характерне залучення значних фінансових ресурсів із досить вагомим рівнем передплати, який досягає близько 60 % від загальної вартості лайнера.

Модернізація круїзного флоту – це напрям, що є досить актуальним серед судновласників [6–10], оскільки з огляду на вартість спорудження круїзних лайнерів (див. табл. 3) вартість модернізації може досягати від 10 % до 30 % від її початкового значення. При цьому буде отримано судно з оновленими, наближеними до нового судна характеристиками, причому зі збільшеною кількістю пасажирів (на 15–20 %) та дохідністю бізнесу.

Як переконливий приклад модернізації щодо збільшення пасажиромісткості можна навести роботи, проведені компанією MSC для її чотирьох лайнерів: «MSC Armonia» (58625 GT, 2001 року будівництва), «MSC Sinfonia» та «MSC Lyrica» (59058 GT, 2003 року будівництва), «MSC Opera» (59058 GT, 2004 року будівництва); три судна компанії «Star Cruises»: «Star Breeze», «Star Legend», «Star pride»; судно «Enchantment of the seas» компанії «Royal Caribbean»; судно «Costa Classica» компанії «Costa Cruises» (1994 року будівництва).

Вживані судна (second-hand ships) зазвичай купують невеликі компанії через відносно невисоку їх вартість (порівняно з новими). Ціна на ринку second-hand суден формується під впливом п'яти факторів: віку судна, фрахтових ставок, інфляції, прогнозів та очікувань власників круїзного бізнесу, ціни на металевий брухт у разі їх утилізації.

Крім того, варто зазначити, що вживані судна можуть бути введені в експлуатацію в найкоротший термін, на відміну від нових суден, період проектування й побудови яких може тривати до трьох років.

Серед перелічених програм розвитку компанії модернізація заслуговує на особливу увагу, оскільки в разі підвищення кількості пасажирів зменшується собівартість перевезень і збільшується дохідність, підвищується рівень комфортабельності й сервісу, надійність суднових технічних засобів і безпека мореплавання з наближенням комплексних характеристик вживаного судна до аналогічного нового, тобто всі фактори, що підвищують конкурентоздатність бізнесу круїзної компанії.

Далі необхідно акцентувати на понятті «модернізація». Так, економічний словник надає таке тлумачення: «Модернізація (англ. *modernization*) – удосконалення, поліпшення об'єкта, приведення у відповідність до нових вимог ринку». Це визначення модернізації стосовно морських суден можна інтерпретувати як системний процес удосконалення, підвищення ринкової конкурентоздатності круїзних суден шляхом застосування проектно-конструкторських, технологічних, фінансово-економічних заходів і процедур. На сучасному етапі розвитку судноплавної галузі модернізація флоту, зокрема круїзного, включає такі етапи, як реновація, переобладнання та модернізація суднової енергетичної установки [11, с. 169–172].

Поняття «реновація» (від лат. *renovatio*) у морській практиці має значення «процес покращення, оновлення, реконструкції, реставрації корпусу без зміни (порушення) загальної структури». Після завершення процедур з оновлення (реставрації) корпусу передбачається його огляд класифікаційним товариством, за позитивних результатів планується видання спеціального сертифіката – hull renovation, який засвідчує рівні реновації 1SS, 2SS, 3SS, що визначаються віком поновлювальних робіт (відповідність стану корпусу після 5, 10 та 15 років експлуатації відповідно).

Основна сутність переобладнання полягає у збільшенні водотоннажності (дедвейта), що здійснюється шляхом одомірного, двомірного чи тримірного підвищення розмірів.

Модернізація суднової енергетичної установки виконується з метою відшкодування її фізичного та морального старіння. Під модернізацією суднової енергетичної установки будемо розуміти проведення комплексу технічних заходів, що спрямовані на її вдосконалення, щоб суднова енергетична установка відповідала сучасним вимогам і рівню технічного процесу в суднової енергетиці [11].

З огляду на те, що кожне пасажирське судно має низку індивідуальних характеристик, які можуть слугувати факторами для прийняття рішення щодо започаткування модернізації, судновласнику бажано мати оціночні критерії, які дають змогу обґрунтовувати рішення щодо проведення модернізації. Перелік таких факторів схематично зображено на рис. 1.

Як уже зазначалося, модернізація шляхом переобладнання та подовження відкриває шлях до збільшення числа пасажирів, нових комфортабельних кают, зон відпочинку, розваг і сервісів. Таке переобладнання здійснюється установкою нової секції по мідель-шпангоуту (див. рис. 2).

Міжнародна суднобудівна галузь за сторічний період проведення модернізації суден накопичила величезний проєктно-конструкторський, технологічний, фінансово-економічний досвід, який був поширений на судна майже всіх типів і конструкцій. Суттєвим підґрунтям для проведення модернізації є стандарти Міжнародної морської організації, правила й вимоги класифікаційних товариств, що спираються на досвід наукових досліджень і конструкторських розробок у цій сфері.

Особливу роль у модернізації суден відіграє переобладнання зі збільшенням розміру судна, оскільки насправді створюється нове судно, яке може відрізнитися від первинного зразка головними розмірами, морехідними якостями, технічними, економічними й безпековими характеристиками та показниками.

Збільшення розміру судна може бути проведене трьома основними способами: одомірне збільшення, двомірне збільшення, тримірне збільшення [11, с. 10]. Основним рішенням одомірного збільшення корпусної конструкції суден є їх подовження. Ця процедура застосовується для суден різних типів, до 2000-х років у такий спосіб здебільшого відбувалося переобладнання суховантажних суден. За умов перенесення центру світового суднобудування в Китай і Південну Корею значно зменшено собівартість будівництва нових суден, а отже, і терміни їх окупності. Таким чином, було суттєво зменшено попит на проведення модернізаційних робіт.

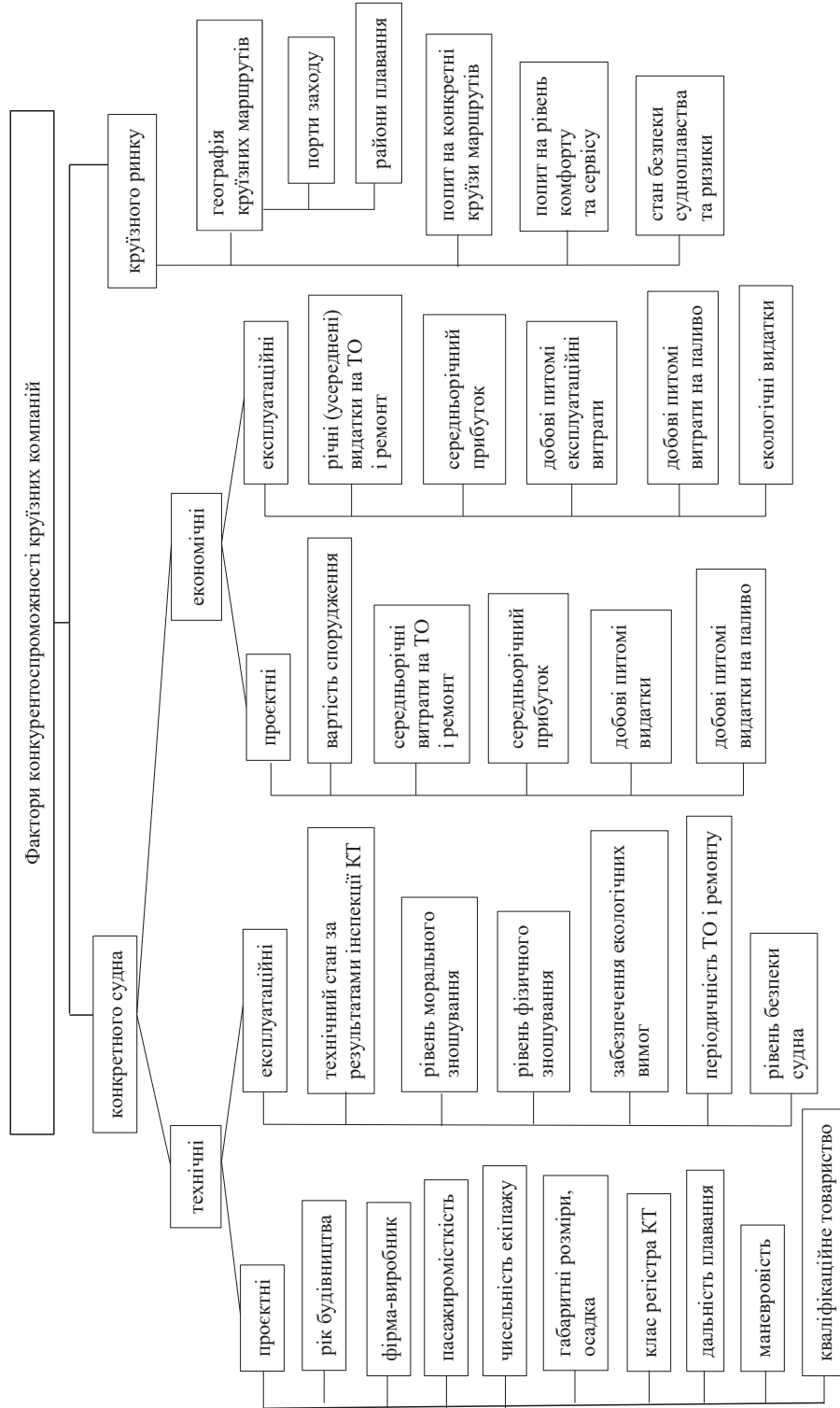


Рис. 1. Фактори, що впливають на конкурентоспроможність морських круїзних компаній

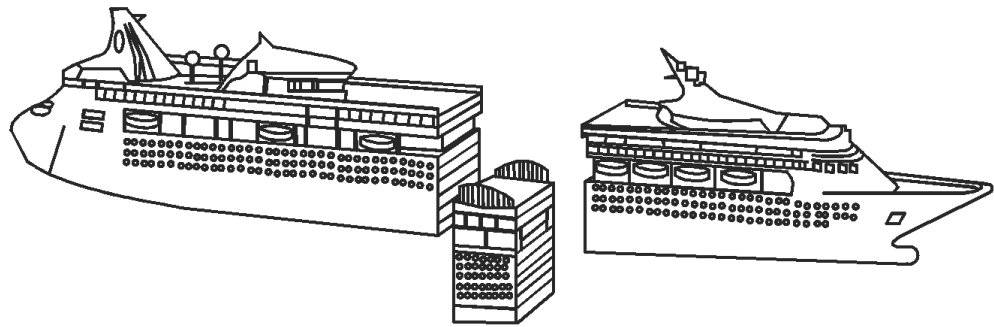


Рис. 2. Модернізація круїзного лайнера з вставкою додаткової секції

Примітка: виконано автором особисто на підставі матеріалів, оприлюднених компанією ROYAL CARIBIAN та класифікаційним товариством DET NORSKE VERITAS.

Зовсім інша картина спостерігається, коли розглядається питання щодо модернізації пасажирських суден, оскільки через значну вартість спорудження ці проекти є досить актуальними. У розгляді цієї науко-технічної проблеми загалом варто підкреслити, що більшість круїзних суден протягом життєвого циклу підлягають модернізації, причому низка з них – неодноразово.

Унаслідок аналізу даних щодо характеристик подовження морських суден торговельного флоту [11, с. 11–13] можна зробити висновок, що для суден довжиною від 50 до 100 м абсолютне збільшення коливається в межах 10–25 м, а відносне – 10–25 %; для суден довжиною, що більша ніж 100 м, – 15–32 м та 1–20 % відповідно.

Межі подовження пасажирських суден мають дещо інше підґрунтя й тлумачення – вони пов'язані з розмірами довжини зони загоряння. Міжнародна конвенція з охорони людського життя на морі SOLAS-74 зі змінами станом на 24 травня 2018 року у Главі II-2 «Конструкція протипожежний захист, виявлення та гасіння пожежі» у правилі 3 проголошує: «Головні вертикальні зони, на які корпус надбудови та рубки судна розділені покриттям класу А, середня довжина й ширина такої зони на будь-якій палубі, як правило, не перевищують 40 м. <...> Вогнестійкі конструкції або конструкції класу А, що утворюється переборками й палубами, повинні виготовлятися зі сталі або іншого матеріалу». Правило 9 цього ж розділу документа присвячене проблемі локалізації пожежу: «Довжина та ширина головних вертикальних зон може плануватися до максимальної величини в 48 м, якщо площа вертикальної зони становить не більше ніж 1600 м² на будь-якій палубі». Таким чином, максимальна довжина, на яку може збільшитися судно, згідно з вимогами конвенції SOLAS-74, становить від 40 м до 48 м.

Конвенція SOLAS-74 у правилі II-2/1.3.2 вимагає, що до прийняття рішення про проведення модернізації необхідно обов'язково залучити державні морські адміністрації (державну адміністрацію прапора), оскільки ремонти, переробки, модернізації, які суттєво змінюють розміри судна чи розміри пасажирських приміщень або суттєво збільшують термін служби судна й обладнання, повинні відповідати вимогам до суден, побудованих на 1 липня 2012 року або після цієї дати, у тому обсязі, який адміністрація вважає обґрунтованим (реальним). Переобладнання судна шляхом подовження є основним видом модернізації,

оскільки при цьому збільшуються розміри судна, тому й залучення державних морських адміністрацій є важливою та обов'язковою процедурою. Крім того, під час розмірної модернізації обов'язково необхідно враховувати ще одне правило Конвенції SOLAS-74 – «безпечне повернення в порт» (Safe Return to Port – SRtP), яке прийняте резолюцією IMO MSC 216/82, що набрала чинності 1 липня 2010 року. Це правило вимагає, щоб пасажирські судна довжиною 120 м або з трьома чи більше вертикальними зонами проєктувалися з метою поліпшення оцінки виживання. Це означає, що в разі затоплення або надзвичайної ситуації (наприклад, пожежі) пасажирів та екіпаж можуть безпечно залишатися на борту судна, доки воно рухається в порт власним ходом. Також цим правилом визначається поріг, за якого екіпаж повинен мати можливість повернутися в порт, не виключаючи евакуацію пасажирів.

Наступний етап щодо обґрунтування подовження ґрунтується на забезпеченні загальної і місцевої міцності корпусу. Зміна його довжини викликає зміну зовнішніх навантажень – сил і моментів сил. Для орієнтовної оцінки розрахункового моменту від згину корпусу, що виникає в перетині мідель-шпагоуту, традиційно використовується залежність

$$M = \frac{D L}{K},$$

де D – водотоннажність судна, кН;

L – довжина судна, м;

K – числовий коефіцієнт.

Оцінка міцності корпусу здійснюється кожним класифікаційним товариством за відповідною методикою як обов'язкова процедура забезпечення його роботоздатності. Як приклад такої оцінки можна застосувати стандарт загальної міцності громадянських суден [13].

Загальна роботоздатність корпусної конструкції модернізованого судна повинна бути оцінена за критерієм міцності. Загальна міцність корпусу визначається нормами міцності морського судна [12–14]:

– за критерієм втомної (експлуатаційної) міцності від багатоциклового навантаження моментом згину в разі хвилювання та за тихої води;

– за граничним станом на згин від дії максимально можливої алгебраїчної суми розрахункових значень хвильового згинного моменту, згинного моменту від удару хвиль і згинного моменту в разі прогибу й перегибу судна на вершині розрахункової хвилі;

– за граничним станом на зріз у разі дії максимально можливої алгебраїчної суми розрахункових значень перерізувальних сил.

Для того щоб здійснити узагальнений аналіз впливу подовження судна на його міцність, необхідно безпосередньо звернутися до стандарту повздовжньої міцності морських суден [15], відповідно до якого момент опору еквівалентного бруса в перерізі по мідель-шпангоуту повинен бути не меншим, ніж величина

$$W = BTf(L),$$

де B – ширина судна, м;

T – осадка, м;

$f(L)$ – функція довжини судна, що збільшується з ростом довжини, м.

З точністю до 2 % можна прийняти, що $f(L) = 8L^{5/3}$. З урахуванням цього отримуємо

$$W = 8BTL^{5/3}.$$

Якщо довжина судна збільшується від початкової довжини L_0 до необхідної L , потрібний момент опору збільшується на величину $\left(\frac{L}{L_0}\right)^{5/3}$.

Якщо в розрахунках буде підтверджено, що корпус судна не має надлишкову міцність, а площа перерізу повздовжніх зав'язків під час подовження не змінюється, осадку судна варто знизити пропорційно величині $\left(\frac{L}{L_0}\right)^{5/3}$. За надлишкової повздовжньої міцності корпус може бути подовжено до величини $L = \left(\frac{W_0}{8BT_0}\right)^{3/5}$ без зміни осадки та без підсилення еквівалентного бруса [11, с. 84].

У тому випадку, коли осадка T зберігається, приріст моменту опору, що вимагається кваліфікаційним товариством, може бути визначено за рівнянням

$$\Delta W = \left[\left(\frac{L}{L_0}\right)^{5/3} - 1 \right] W_0,$$

де W_0 – момент опору еквівалентного бруса судна до його подовження [11, с. 84].

Відомо, що прибуток компанії визначається так:

$$P = R - C,$$

де P – прибуток компанії від експлуатації судна;

R – дохід компанії від експлуатації судна;

C – капітальні та експлуатаційні витрати компанії.

Водночас варто зауважити, що прибуток судна до модернізації становить

$$P_1 = R_1 - C_1,$$

а після модернізації –

$$P_2 = R_2 - C_2.$$

Це дає можливість визначити прибуток (ефект) від проведення модернізації:

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_2 - P_1 = (R_2 - C_2) - (R_1 - C_1) = \\ &= ((R_1 + \Delta R) - (C_1 + \Delta C)) - (R_1 - C_1) = \Delta R - \Delta C, \end{aligned} \quad (1)$$

який визначається як різниця додаткового доходу ΔR та додаткових витрат ΔC від її проведення.

Оптимальний пошук довжини додаткової секції будемо проводити з опертям на додаткову кількість кают $n_{кт}^n$, що розміщуються вздовж діаметральної площини судна, і величина $n_{кт}^n$ визначить оптимальну довжину додаткової секції судна:

$$l_{сек} = b_k n_{кт}^n, \quad (2)$$

де b_k – ширина додаткової каюти.

Водночас отримуємо можливість усереднено оцінити кількість пасажирів, що розміщуються в додатковій секції:

$$\Delta N_{\text{пас}}^{\text{д}} = q_{\text{кт}}^{\text{д}} n_{\text{кт}}^{\text{д}} k_{\text{р}}^{\text{д}} z_{\text{п}}^{\text{д}}, \quad (3)$$

де $q_{\text{кт}}^{\text{д}}$ – прогнозована кількість пасажирів в одній каюті додаткової секції;
 $k_{\text{р}}^{\text{д}}$ – кількість рядів кают на одній палубі;
 $z_{\text{п}}^{\text{д}}$ – кількість палуб на судні.

Додатковий дохід визначається кількістю пасажирів, яку може прийняти судно:

$$\Delta R = \sum_{i=1}^n (m_{\text{кт}i}^{\text{д}} \Delta N_{\text{пас}i}^{\text{д}} (C_{\text{бт}i} + C_{\text{срв}i})) = \sum_{i=1}^n (m_{\text{кт}i}^{\text{д}} q_{\text{кт}}^{\text{д}} n_{\text{кт}}^{\text{д}} k_{\text{р}}^{\text{д}} z_{\text{п}}^{\text{д}} (C_{\text{бт}i} + C_{\text{срв}i})), \quad (4)$$

де $m_{\text{кт}i}^{\text{д}}$ – кількість кают i -го класу, які виготовлені в додаткові секції судна;
 $\Delta N_{\text{пас}i}^{\text{д}}$ – усереднена кількість додаткових пасажирів у каюті i -го класу;
 $C_{\text{бт}i}$ – вартість білету каюти i -го класу;
 $C_{\text{срв}i}$ – вартість додаткових сервісів і послуг, які отримує пасажир каюти i -го класу (ресторани, екскурсії, магазини, кінотеатри, SPA-салони тощо).

Додаткові витрати судна в разі його подовження будемо визначати за залежністю

$$\Delta C = \Delta C_{\text{сарех}} + \Delta C_{\text{опех}}, \quad (5)$$

де $\Delta C_{\text{сарех}}$ – капітальні витрати судна на модернізацію;
 $\Delta C_{\text{опех}}$ – збільшення операційних витрат судна після модернізації.

Витрати $\Delta C_{\text{сарех}}$ – вартість проведення модернізації круїзного судна – будемо оцінювати за залежністю [16]

$$\Delta C_{\text{сарех}} = C_{\text{Н}}^{\text{д}} + C_{\text{ор}}^{\text{д}} + C_{\text{ДГ}}^{\text{д}} + C_{\text{Е}}^{\text{д}} + GE + S + ES, \quad (6)$$

де $C_{\text{Н}}^{\text{д}}$ – вартість виготовлення додаткової секції корпусу;
 $C_{\text{ок}}^{\text{д}}$ – вартість проведення робіт з оздоблення додаткових кают;
 $C_{\text{ДГ}}^{\text{д}}$ – вартість встановлення (заміни) додаткових дизель-генераторів;
 $C_{\text{Е}}^{\text{д}}$ – вартість встановлення (заміни) додаткового обладнання;
 GE – загальні витрати на виробництво (модернізацію);
 S – прибуток верфі;
 ES – додаткові витрати.

Вартість виготовлення додаткової секції лайнера [16] становить

$$C_{\text{Н}} = CA_c + CF_c, \quad (7)$$

де CA_c – вартість матеріалу;
 CF_c – вартість виробництва.

$$CA_c = G_c m_{\text{ст}} = \gamma_G n_{\text{кт}}^{\text{д}} b_{\text{кт}} m_{\text{ст}}, \quad (8)$$

де G_c – вага додаткової секції корпусу;
 $m_{\text{ст}}$ – вартість одиниці конструкційної сталі;
 γ_G – питома вага секції по ширині каюті.

Вартість виробництва [16] становить

$$CF_c = Hh_c m_{\text{HP}}, \quad (9)$$

де Hh_c – необхідна кількість людино-годин;
 m_{HP} – вартість застосування людської сили

$$Hh_c = LI_1 C_1 + LI_2 n_{\text{кт}}^{\text{д}} k_{\text{р}}^{\text{д}} z_{\text{п}}^{\text{д}}, \quad (10)$$

де LI_1 – трудомісткість (labor intensity), кількість часу, що витрачається на виробництво одиниці продукції (у цьому випадку секції корпусу), людино-годин/тон;

LI_2 – трудомісткість оздоблювальних робіт кают додаткової секції,

$$Hh_c = LI_1 \gamma_G n_{кт}^d b_{кт} + LI_2 n_{кт}^d k_p^d z_{п} = n_{кт}^d (LI_1 \gamma_G b_{кт} + LI_2 k_p^d z_{п}). \quad (11)$$

Вартість проведення оздоблювальних робіт в додаткових каютах становить

$$C_{оп}^d = CK n_{кт}^d k_p^d z_{п}, \quad (12)$$

де CK – вартість оздоблення й обладнання однієї каюти.

Заміна дизель-генераторів відбувається за умови визначення потрібних електроенергетичних потужностей модернізованого судна та порівняння з фактичними енергетичними можливостями судна, тобто у випадку, якщо буде дотримано нерівність

$$P_{DG\Sigma\phi} \geq P_{DG\Sigma M} = \frac{P_{режМ}(n_{кт}^d)}{0,8}, \quad (13)$$

де $P_{режМ}$ – сумарне значення потужності, що споживається приймачами в розрахунковому режимі (визначається залежно від нової довжини судна, числа кают (загальної кількості пасажирів)).

Таким чином, вартість встановлення додаткових дизель-генераторів визначається як

$$C_{дг}^d = \begin{cases} 0, & \text{якщо виконується умова (13)} \\ A - \text{вартість встановлення нових дизель-генераторів} \\ & \text{згідно з каталогом фірми-виробника.} \end{cases} \quad (14)$$

До переліку додаткового обладнання, яке прогнозується встановити на судні в результаті модернізації, варто віднести інженерне устаткування та комунікації для таких процесів:

- кондиціонування (обігрів та охолодження);
- водопостачання (опріснення, підготовка води питної та для миття (washing water));
- водовідведення («сірої» і «чорної» води);
- переробки й утилізації сміття;
- рухально-рульового комплексу (РПК);
- сервісів на борту судна (ресторани, бари, торговельно-розважальні центри).

Для обігріву й охолодження кают на суднах використовуються кондиціонери. Теплова потужність кондиціонерів, що використовуються для обігріву кают додаткової секції, визначається за формулою

$$P_{кн.т}^d = \frac{V_{кт\Sigma}^d \Delta t_k}{860} = \frac{(V_{кт}^d n_{кт}^d k_p^d z_{п} + V_{cor}) \Delta t_k}{860}, \text{ кВт}, \quad (15)$$

де $V_{кт}^d$ – об'єм каюти в додатковій секції, м³;

V_{cor} – об'єм коридорів, м³;

Δt_k – найбільша різниця температур у каюті та назовні, °С.

Додаткова потужність кондиціонерів, яка витрачається на охолодження кают і приміщень нової (вставної) секції корпусу, розраховується за залежністю

$$P_{\text{кн.хол}}^{\text{д}} = n_{\text{кт}}^{\text{д}} k_{\text{р}}^{\text{д}} z_{\text{п}} (Q_1 + Q_2 + Q_3), \quad (16)$$

де Q_1 – потужність кондиціонера для порожніх кают (приміщень), кВт;

$Q_1 = A_{\text{кт}} h q 10^{-3}$, де $A_{\text{кт}}$ – площа каюти, м²; h – висота стелі, м; q – коефіцієнт освітленості;

Q_2 – тепловотоки, що йдуть від пасажирів, 0,1–0,3 кВт;

Q_3 – тепловотоки, що йдуть від побутової техніки, 0,2–0,5 кВт.

Заміна кондиціонерів відбувається за умови

$$\begin{cases} (P_{\text{кн.т}}^{\text{р}} + P_{\text{кн.т}}^{\text{д}}) \geq P_{\text{кн.т}}^{\text{ф}} \\ (P_{\text{кн.хол}}^{\text{р}} + P_{\text{кн.хол}}^{\text{д}}) \geq P_{\text{кн.хол}}^{\text{ф}} \end{cases}. \quad (17)$$

Отже, вартість встановлення додаткових кондиціонерів визначається як

$$C_{\text{кн}}^{\text{д}} = \begin{cases} 0, \text{ якщо виконується умова (17)} \\ B - \text{вартість встановлення нових кондиціонерів} \\ \text{згідно з каталогом фірми-виробника.} \end{cases} \quad (18)$$

Водопостачання пасажирів додаткової секції потребує таких операцій, як опріснення, підготовка води питної та для миття (washing water). Норми водопостачання на добу питної води, згідно з усередненими вимогами провідних класифікаційних товариств, становлять 75–100 л/людина, води для миття – 150–200 л/людина, стокові води становлять приблизно 300 л/людина. Кількість додаткової прісної води визначається за залежністю

$$V_{\text{вод}}^{\text{д}} = (220 \dots 300) N_{\text{пас}}^{\text{д}} = (220 \dots 300) q_{\text{кт}}^{\text{д}} n_{\text{кт}}^{\text{д}} k_{\text{р}}^{\text{д}} z_{\text{п}}, \text{ л/доба}. \quad (19)$$

За результатами розрахунку $V_{\text{вод}}^{\text{д}}$ визначається спроможність водоопріснювальної установки щодо забезпечення суднових потреб за результатами модернізації судна

$$PD_{\text{пс}} \geq PD_{\text{ф}} + V_{\text{вод}}^{\text{д}}, \text{ л/добу}, \quad (20)$$

де $PD_{\text{пс}}$ – паспортна продуктивність водоопріснювальної установки, л/добу;

$PD_{\text{ф}}$ – фактична продуктивність водоопріснювальної установки до модернізації, л/добу.

Якщо нерівність (15) не виконується, проводиться заміна опріснювальної установки на більш продуктивну. Отже, вартість встановлення додаткових кондиціонерів визначається як

$$C_{\text{воу}}^{\text{д}} = \begin{cases} 0, \text{ якщо виконується умова (20)} \\ D - \text{вартість встановлення нової} \\ \text{(або модернізації старої) водоопріснювальної установки} \\ \text{згідно з каталогом фірми-виробника.} \end{cases} \quad (21)$$

Збільшення розмірів судна здійснює вагомий вплив на його маневрові характеристики, а отже, і на рухально-рульовий комплекс. Так, у разі використання звичайних обтічних рулів їх площа за збільшення довжини судна буде визначатися традиційно за формулою

$$A_{\Sigma\text{М}} = \mu L_{\perp\text{М}} T_{\text{М}} = \mu (L_{\perp} + l_{\text{ск}}) T_{\text{М}} = \mu (L_{\perp} + n_{\text{кт}}^{\text{д}} b_{\text{кт}}) T_{\text{М}}, \quad (22)$$

де μ – коефіцієнт, що залежить від призначення судна;

$L_{\perp M}$ – відстань між перпендикулярами модернізованого судна, м;

T_M – осадка модернізованого судна, м.

Тоді вартість виготовлення нових рушіїв становитиме

$$C_{EPH} = \gamma_{PH} A_{EM} = \gamma_{PH} \mu (L_{\perp} + n_{KT}^n b_{KT}) T_M, \quad (23)$$

де γ_{PH} – питома вартість виготовлення рулів і рульових пристроїв, гр. од./м².

Оцінку тяги, яку створюють підрулюючі пристрої, можна провести з огляду на рекомендації компанії Lips [17]:

$$T_{EM} = 50 A_{YM} + 150 A_{LM}, \quad (24)$$

де A_{YM} – величина площі проєкцій надводної частини на діаметральну площину, м²;

A_{LM} – величина площі проєкцій підводної частини на діаметральну площину, м².

Цей вираз можна переписати із застосуванням значення площі додаткової вставки на діаметральну площину:

$$T_{EM} = 50 (A_{YM} + H_n^n n_{KT}^n b_{KT}) + 150 (A_{LM} + T_M n_{KT}^n b_{KT}), \quad (25)$$

де H_n^n – висота надводної частини судна з додатковою секцією;

T_M – осадка модернізованого судна.

Значення сили T_{EM} за виразом (20) впливає на ефективність роботи рухально-рульового комплексу судна E , яка має комплексний характер, що можна відобразити таким виразом [17]:

$$E_M = E_M (n_{KT}^n) = E_M (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3 \dots \varepsilon_n), \quad (26)$$

де $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3 \dots \varepsilon_n$ – параметри роботи ДРК, що характеризують його ефективність під час виконання n маневрів [17].

Тільки після такої оцінки може бути прийнято рішення щодо проєктування підрулювальних пристроїв із новими характеристиками. Це становить окреме завдання оптимізації ДРК більш нижчого рівня відповідно до загальної розмірної модернізації суден.

Визначення величини загальних витрат на модернізацію GE ґрунтується на досвіді конкретного суднобудівного підприємства. Ці витрати за рекомендацією [17] орієнтовно становлять 90 % від вартості праці, затраченої на суднобудівне виробництво в частині проведення модернізації, зокрема

$$GE = 0,9CF_c. \quad (27)$$

Прибуток верфі становить приблизно 5 % від вартості праці на донному виробництві $S = 0,05CF_c$.

Додаткові витрати ES становлять приблизно до 10 % від загальних витрат:

$$ES = 0,1GE. \quad (28)$$

Витрати ΔC_{orex} розраховуються за рівнянням

$$\Delta C_{orex} = \Delta C_{зп} + \Delta C_{вх} + \Delta C_{пд} + \Delta C_{пл} + \Delta C_{інв} + \Delta C_{рем} + \Delta C_{ам} + \Delta C_{прг} + \Delta C_{коф}, \quad (29)$$

де $\Delta C_{зп}$ – збільшення фінансування на підвищення заробітної плати (основної і додаткової) екіпажу, зокрема персоналу обслуговування;

$\Delta C_{вх}$ – збільшення витрат на харчування пасажирів та екіпажу;

$\Delta C_{\text{пд}}$ – збільшення податків у зв'язку зі збільшенням пасажиромісткості й водотоннажності судна;

$\Delta C_{\text{пл}}$ – додаткові витрати на збільшення генерації енергії та паливо;

$\Delta C_{\text{інв}}$ – збільшення витрат на малоцінний і швидкозношуваний матеріал;

$\Delta C_{\text{рем}}$ – зростання витрат на ремонт і технічне обслуговування;

$\Delta C_{\text{ам}}$ – збільшення амортизаційних виплат;

$\Delta C_{\text{прт}}$ – підвищення величини портових зборів;

$\Delta C_{\text{коф}}$ – зростання витрат на комплексне обслуговування флоту.

Фінансування $\Delta C_{\text{зп}}$ можна визначити за виразом

$$\Delta C_{\text{зп}} = \sum_{i=1}^p \frac{\Delta N_{\text{пас}}^{\text{д}}}{K_{\text{норма}}} S_{\text{ст}} = \sum_{i=1}^n \frac{q_{\text{кт}}^{\text{д}} n_{\text{кт}}^{\text{д}}}{K_{\text{норма}}} S_{\text{ст}}. \quad (30)$$

де $K_{\text{норма}}$ – нормативний коефіцієнт, що встановлює кількість членів екіпажу залежно від кількості пасажирів;

$S_{\text{ст}}$ – грошова ставка заробітної плати членів екіпажу відповідного фаху;

p – кількість груп спеціалістів визначеного фаху, які залучаються для обслуговування пасажирів $\Delta N_{\text{пас}}^{\text{д}}$.

Додаткові витрати на харчування визначають як

$$\Delta C_{\text{вх}} = S_{\text{хр}}^{\text{пас}} q_{\text{кт}}^{\text{д}} n_{\text{кт}}^{\text{д}}, \quad (31)$$

де $S_{\text{хр}}^{\text{пас}}$ – усереднена вартість харчування одного пасажирів.

Прогнозоване збільшення податків, що спочуються судноплавною компанією, пропонується розраховувати за виразом

$$\Delta C_{\text{пд}} = k_{\text{пд}} q_{\text{кт}}^{\text{д}} n_{\text{кт}}^{\text{д}}, \quad (32)$$

де $k_{\text{пд}}$ – коефіцієнт пропорційності, що отримується шляхом обробки статистичних даних діяльності компанії; він встановлює пропорційний зв'язок величини податків і кількості пасажирів.

Аналогічно виразу (27) можна знайти додаткові витрати, які відмічені в рівнянні (28).

Першочерговим фактором, який необхідно забезпечити під час модернізації судна, є міцність корпусу. За будь-яких видів модернізації, що стосуються корпусу, класифікаційні товариства вимагають перевірку його на міцність. Ця перевірка повинна здійснюватися за критеріями експлуатаційної (втомної) міцності, граничного стану на згин і перегин, граничного стану на зріз.

Перевірка за критерієм експлуатаційної (втомної) міцності виконується за залежністю [12]:

$$\frac{K_b |M_{\text{в1}}| + K_{\text{ТВ1}} |M_{\text{ТВ1}}|}{W_1} 10^3 \leq \sigma_A, \quad (33)$$

де $M_{\text{в1}}$ – хвильовий згинальний момент на відомій висоті хвилі h , який залежить від квадрату довжини судна [12], тобто:

$$M_{\text{в1}} = f(L_m^2) = f((L_c + l_{\text{ск}})^2) = f((L_c + n_{\text{кт}}^{\text{д}} b_{\text{кт}})^2), \text{ кН}\cdot\text{м};$$

$M_{\text{ТВ1}}$ – величина згинального моменту на тихій воді, яка визначається за відомою залежністю $M_{\text{ТВ1}} = K_{\text{ТВ}} gDL_m = K_{\text{ТВ}} gD(L_c + n_{\text{кт}}^{\text{д}} b_{\text{кт}})$, кН·м;

W_1 – осьовий момент опору небезпечного перерізу корпусу, см³;

K_b – коефіцієнт впливу високочастотних напружень;

$K_{ТВ1}$ – коефіцієнт, що визначає розтягнуті повздовжні зв'язки корпусу на тихій воді;

σ_A – допустимі напруження під час розрахунку на опір втомі.

Перевірка загальної міцності за граничним станом повинна показати, що в разі прогину й перегину корпусу судна на хвилі в завантаженому стані відношення граничного моменту за згину корпусу до найбільшого розрахункового згинального моменту задовольняє вимогу

$$K_{\phi} = \frac{M_{гр}}{M_B + M_y + M_{ТВ}} \geq K_{min} K_k, \quad (34)$$

де $M_{гр}$ – граничний згинальний момент, який також перебуває в залежності від нової довжини судна, кН·м;

M_B – максимальний хвильовий згинальний момент на відомій висоті хвилі h , який залежить від квадрату довжини судна [12], кН·м;

$M_{ТВ}$ – найбільша величина згинального моменту на тихій воді, яка визначається за відомою залежністю $M_{ТВ} = K_{ТВ} gDL_m = K_{ТВ} gD(L_c + n_{кт}^d b_{кт})$, кН·м;

K_{min} – мінімальний коефіцієнт запасу міцності;

K_k – коефіцієнт корекції навантаження.

Перевірку за граничним станом корпусу на зріз здійснюється за умови

$$\frac{N_{гр}}{N_{зм} + N_{ТВ}} \geq 1, 2, \quad (35)$$

де $N_{гр}$ – гранична величина перерізуючої сили для поперечного перерізу корпусу, кН;

$N_{зм}$ – змінний складник перерізуючої сили, кН;

$N_{ТВ}$ – максимально можлива в поперечному перерізі корпусу перерізуюча сила від навантаження судна на тихій воді.

Визначення оптимальної довжини секції ґрунтується на створенні відповідної математичної моделі. Математична модель задачі з оптимізації традиційно включає три елементи: цільову функцію, обмеження та граничні умови. Як критерій побудови цільової функції застосовуємо прибуток, який отримає судноплавна компанія від експлуатації модернізованого судна. Таким чином, задача оптимального визначення довжини додаткової секції лайнера визначається кількістю кают вздовж діаметральної площини.

Отже, модель задачі оптимального визначення довжини додаткової секції круїзного судна з урахуванням рівнянь (1), (5), (6) буде мати такий вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta P(n_{кт}^d) = & \left[\sum_{i=1}^n (m_{ктi}^d q_{ктi}^d n_{ктi}^d k_p^d z_{пi} (C_{бти} + C_{срви})) - \right. \\ & - ((C_H^d(n_{кт}^d) + C_{ор}^d(n_{кт}^d) + C_{ДГ}^d(n_{кт}^d) + C_E^d(n_{кт}^d) + GE(n_{кт}^d) + \\ & + S(n_{кт}^d) + ES(n_{кт}^d)) + (\Delta C_{зп}(n_{кт}^d) + \Delta C_{вх}(n_{кт}^d) + \Delta C_{пд}(n_{кт}^d) + \\ & + \Delta C_{пл}(n_{кт}^d) + \Delta C_{інв}(n_{кт}^d) + \Delta C_{рем}(n_{кт}^d) + \Delta C_{ам}(n_{кт}^d) + \\ & \left. + \Delta C_{прт}(n_{км}^d) + \Delta C_{коф}(n_{кт}^d)) \right] \rightarrow \max \end{aligned} \quad (36)$$

Обмеження для цільової функції (36) утворюють групи рівнянь, які враховують:

- вартість проведення модернізації (7)–(12);
- вартість установки додаткового обладнання (13)–(32);
- операційні витрати (30)–(32);
- виконання умов забезпечення міцності корпусу як функції довжини корпусу згідно з вимогами класифікаційних товариств (33)–(34).

Граничні умови, які накладаються на задачу оптимізації, враховують область допустимих значень змінної $n_{кт}^n$, яка пов'язана з допустимою довжиною додаткової секції ($1 \leq n_{кт}^n \leq \frac{[l_c]}{b_{кт}}$), про що вже йшлося раніше.

Висновки. У роботі запропонована модель проведення розмірної модернізації круїзного судна з визначенням довжини додаткової секції за критерієм забезпечення найбільшої прибутковості.

ЛІТЕРАТУРА

1. Cruise Market Watch. URL: <https://cruisemarketwatch.com/passenger-origins>
2. Cruise Lines International Association (CLIA). URL: <https://www.cruising.org.au>
3. Det Norske Veritas Holding AS (“DNV Holding”). URL: <https://www.dnv.com>
4. Chiotopoulos A., Wuersig G.-M., Ellefsen A. Retrofitting cruise ships to LNG by elongation. *SAFETY4SEA*. 2014. URL: <https://safety4sea.com/retrofitting-cruise-ships-to-lng-by-elongation-2/>
5. Жихарева В. В. Современные тенденции развития рынка круизного судоходства. *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті* : збірник наукових праць. Одеса : ОНМУ, 2012. № 39. С. 153–167.
6. Боровик С. С. Аналіз стану і перспективи розвитку світового круїзного флоту. *Організація транспортного процесу та управління роботою флоту на ринку міжнародного судноплавства* : монографія / О. Г. Шибаетов, О. Л. Дрожжин, Н. В. Судник та ін. Одеса : Купрієнко С. В., 2018. С. 38–45.
7. Сёмин А. А. Проектирование и эксплуатация пассажирских судов внутреннего смешанного плавания по критерию комфортабельности : монография. Киев : Лира-К, 2020. 190 с.
8. Егоров А. Г. Влияние работ по переоборудованию круизных пассажирских судов на формирование помещений для пассажиров и экипажа. *Вісник Одеського національного морського університету*. 2020. Вип. 1 (61). С. 29–54.
9. Егоров А. Г. Оценка влияния старения флота и модернизаций на общую пассажироместимость речных круизных пассажирских судов. *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2020. Спецвыпуск № 1. С. 149–153.
10. Егоров А. Г. Анализ возможности реализации инновационных решений на модернизированных и конверсионных речных круизных

- пассажи́рских судах. *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2019. Спецвыпуск № 1. С. 240–246. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-S-I-240-246
11. Лазарев А. Н., Марченко С. С. Теоретические аспекты модернизации судов смешанного «река – море» плавания. *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. 2016. Вып. 1 (35). С. 76–84. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskie-aspekty-modernizatsii-sudov-smeshannogo-reka-more-plavaniya/viewer>
 12. Гундобин А. А., Финкель Г. Н. Размерная модернизация и переоборудование судов : монография. Ленинград : Судостроение, 1977. 192 с.
 13. Нормы прочности морских судов. Регистр СССР. Ленинград, 1991. 91 с.
 14. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов (часть II). Корпус. НД № 2-020101-095. Санкт-Петербург, 2017. 229 с.
 15. DNV GL. Rules for classification rules for classification ships. Edition October 2015. Part 5. Ship types. Chapter 4. Passenger ships. URL: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/RU-SHIP/2015-10/DNVGL-RU-SHIP-Pt5Ch4.pdf>
 16. Міжнародна конвенція про вантажну марку : міжнародний документ від 5 квітня 1966 р. (набув чинності для України 25 січня 1994 р.) / *Верховна Рада України*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/896_007#Text
 17. Centre for Marine Technology and Ocean Engineering. URL: <http://www.mar.ist.utl.pt/mventura/Projecto-Navios-I/EN/SD-1.3.2-Cost%20Estimate.pdf>
 18. Гофман А. Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна : справочник. Ленинград : Судостроение, 1988. 359 с.

REFERENCES

1. Cruise Market Watch. Retrieved from: <https://cruisemarketwatch.com/passenger-origins> [in English]
2. Cruise Lines International Association (CLIA). Retrieved from: <https://www.cruising.org.au> [in English]
3. Det Norske Veritas Holding AS (“DNV Holding”). Retrieved from: <https://www.dnv.com> [in English]
4. Chiotopoulos, A., Wuersig, G.-M., Ellefsen, A. (2014). Retrofitting cruise ships to LNG by elongation. *SAFETY4SEA*. Retrieved from: <https://safety4sea.com/retrofitting-cruise-ships-to-lng-by-elongation-2/> [in English]
5. Zhikhareva, V. V. (2012). Current trends in the development of the cruise shipping market [Sovremennye tendentsii razvitiya rynka kruiznogo sudokhodstva]. *Rozvytok metodiv upravlinniu ta hospodariuvannia na transporti: zbirnyk naukovykh prats – Development of methods of*

- management and administration of transport: a collection of scientific papers*. Odesa : ONMU, no. 39, pp. 153–167. [in Russian]
6. Borovyk, S. S. (2018). Analysis of the state and prospects of the world cruise fleet [Analiz stanu i perspektyvy rozvytku svitovoho kruiznoho flotu]. *Orhanizatsiia transportnoho protsesu ta upravlinnia robotoiu flotu na rynku mizhnarodnoho sudnoplavstva: monohrafiia – Organization of transport process and fleet management in the international shipping market: monograph* / O. H. Shybaiev, O. L. Drozhzhyn, N. V. Sudnyk et al. Odesa : Kupriienko S. V., pp. 38–45. [in Ukrainian]
 7. Semin, A. A. (2020). Design and operation of passenger ships of inland mixed navigation according to the criterion of comfort: monograph [Proektirovanie i ekspluatatsiya passazhirskikh sudov vnutrennego smeshannogo plavaniya po kriteriyu komfortabel'nosti: monografiya]. Kyiv : Lira-K. [in Russian]
 8. Egorov, A. G. (2020). Influence of work on the re-equipment of cruise passenger ships on the formation of accommodation for passengers and crew [Vliyanie rabot po pereoborudovaniyu kruiznykh passazhirskikh sudov na formirovanie pomeshcheniy dlya passazhirov i ekipazha]. *Visnyk Odeskoho natsionalnoho morskoho universytetu – Bulletin of Odessa National Maritime University*, iss. 1 (61), pp. 29–54. [in Russian]
 9. Egorov, A. G. (2020). Assessment of the impact of fleet aging and modernization on the overall passenger capacity of river cruise passenger ships [Otsenka vliyaniya stareniya flota i modernizatsiy na obshchuyu passazhirovmostimost' rechnykh kruiznykh passazhirskikh sudov]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra – Proceedings of the Krylovsky State Scientific Center*, no. 1, pp. 149–153. [in Russian]
 10. Egorov, A. G. (2019). Analysis of the possibility of implementing innovative solutions on modernized and conversion river cruise passenger ships [Analiz vozmozhnosti realizatsii innovatsionnykh resheniy na modernizirovannykh i konversionnykh rechnykh kruiznykh passazhirskikh sudakh]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra – Proceedings of the Krylovsky State Scientific Center*, no. 1, pp. 240–246. DOI: 10.24937/2542-2324- 2019-1-S-I-240-246 [in Russian]
 11. Lazarev, A. N., & Marchenko, S. S. (2016). Theoretical aspects of the modernization of ships of mixed “river – sea” navigation [Teoreticheskie aspekty modernizatsii sudov smeshannogo “reka – more” plavaniya]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova – Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov*, iss. 1 (35), pp. 76–84. Retrieved from: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskie-aspekty-modernizatsii-sudov-smeshannogo-reka-more-plavaniya/viewer> [in Russian]

12. Gundobin, A. A., & Finkel', G. N. (1977). Dimensional modernization and re-equipment of ships: monograph [Razmernaya modernizatsiya i pereoborudovanie sudov: monografiya]. Leningrad : Sudostroenie. [in Russian]
13. Norms of strength of sea vessels. Register of the USSR [Normy prochnosti morskikh sudov. Registr SSSR] (1991). Leningrad. [in Russian]
14. Russian Maritime Register of Shipping. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Vessels (Part II). Frame. ND № 2-020101-095 [Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov (chast' II). Korpus. ND № 2-020101-095] (2017). Saint Petersburg. [in Russian]
15. DNV GL. Rules for classification rules for classification ships. Edition October 2015. Part 5. Ship types. Chapter 4. Passenger ships. Retrieved from: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/RU-SHIP/2015-10/DNVGL-RU-SHIP-Pt5Ch4.pdf> [in English]
16. Verkhovna Rada of Ukraine (1994). International Trademark Convention: international document of April 5, 1966 (entered into force for Ukraine on January 25, 1994) [Mizhnarodna konventsiiia pro vantazhnu marku: mizhnarodnyi dokument vid 5 kvitnia 1966 r. (nabuv chynnosti dlia Ukrainy 25 sichnia 1994 r.)]. Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/896_007#Text [in Ukrainian]
17. Centre for Marine Technology and Ocean Engineering. Retrieved from: <http://www.mar.ist.utl.pt/mventura/Projecto-Navios-I/EN/SD-1.3.2-Cost%20Estimate.pdf> [in English]
18. Gofman, A. D. (1988). Propulsion-steering complex and vessel maneuvering: reference book [Dvizhitel'no-rulevoy kompleks i manevrirovanie sudna: spravochnik]. Leningrad : Sudostroenie. [in Russian]

КОМПЛЕКСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ
«ЗЕЛЕНОГО» СУДНОПЛАВСТВА

Ю.К. Яглицький

к. т. н., доцент кафедри суднобудування та ремонту суден,
Херсонський навчально-науковий інститут
Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-4865-0411

Анотація

Вступ. У наш час екологічні стандарти для суден стають дедалі жорсткішими, тому судноплавна галузь, яка є одним із перспективних засобів транспортування, що забезпечує більшу частину світової торгівлі, також відчуває суспільний тиск через необхідність удосконалення своєї роботи та вжиття заходів для зниження забруднень. Новітньою тенденцією в судноплаванні є так зване «зелене судноплавання» – комплекс технологічних інновацій, який привів до розроблення суден, обладнання та пального, які більш безпечні екологічно. **Метою** дослідження є аналіз можливостей застосування нових матеріалів, підвищення рівня енергоефективності судна, використання сучасних ефективних енергозберігаючих технологій у процесі створення суден, удосконалення енергоустановок судна, які відповідають новим вимогам екологічних стандартів і зменшують обсяг шкідливих викидів, розроблення екологічного та альтернативних видів палива, створення «екосуден». **Результати.** Розглянуті й досліджені основні напрями вирішення екологічних проблем у судноплаванні, які спрямовані на зменшення небажаних антропогенних змін навколишнього середовища. **Висновки.** У результаті проведеного дослідження обґрунтовано раціональність проведення розробок із таких питань: створення та класифікації нових матеріалів і технологій із використання композитів для корпусів суден, а також як багатофункціональних теплозвукоізоляційних матеріалів і покриттів; оптимізації обводів корпусів зі зміною дизайну та конструктивних особливостей судна; використання енергії вітру для підвищення рівня енергоефективності судна; удосконалення наявного досвіду у сфері розроблення й використання екологічного та альтернативних видів палива, зменшення негативного впливу на навколишнє середовище викидів із суден, а також побудови «екосуден» за принципами «зеленої логістики», яка дає можливість скоротити відходи й забруднення на всьому ланцюжку виробництва та поставок.

Ключові слова: «зелене судноплавання», композитні матеріали, оптимізація обводів суден, енергія вітру, альтернативні види палива, шкідливі викиди, екологічні стандарти, проекти «екосуден».

COMPREHENSIVE STUDY OF CURRENT TRENDS IN “GREEN” SHIPPING

Yu.K. Yahlytskyi

PhD in Engineering,

Associate Professor at the Department of Shipbuilding and Ship's Repair,
Kherson Educational-Scientific Institute
of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-4865-0411

Summary

Introduction. In our time, environmental standards for ships are becoming more stringent, so the shipping industry, which is one of the promising means of transportation that provides most of the World Trade, is also experiencing public pressure from the need to improve its work and take measures to reduce pollution. The latest trend in shipping is the so – called “Green navigation” – a complex of technological innovations that has led to the development of vessels, equipment and fuel that are more environmentally friendly. **Purpose.** Research and analysis of the possibilities of using new materials, improving the level of energy efficiency of the vessel, using modern efficient energy-saving technologies in the creation of vessels, improving the ship's power plants that meet the new requirements of environmental standards, reduce the amount of harmful emissions, environmental and alternative fuels, creating “eco-vessels”. **Results.** The main directions of solving environmental problems in navigation, which are aimed at reducing undesirable anthropogenic changes in the environment, are considered and studied. **Conclusions.** As a result of the research, the rationality of development in the field of creation and classification of new materials and technologies with the use of composites for both ship hulls and as multifunctional heat and sound insulation materials and coatings is justified; optimization of Hull contours with changes in the design and structural features of the vessel; the use of wind energy to increase the level of energy efficiency of the vessel; improvement of existing experience in the development and use of environmental and alternative fuels and reduce the negative impact of emissions from ships on the environment, as well as the construction of “eco-vessels” according to the principles of “green logistics”, which reduces waste and pollution throughout the production and supply chain.

Key words: “green navigation”, composite materials, optimization of ship contours, wind energy, alternative fuels, harmful emissions, environmental standards, “eco-vessels” projects.

Вступ і постановка проблеми. У наш час екологічні стандарти для суден стають дедалі жорсткішими, тому судноплавна галузь, яка є одним із перспективних засобів транспортування, що забезпечує більшу частину світової торгівлі, також відчуває суспільний тиск через необхідність удосконалення своєї роботи та вжиття заходів для зниження забруднень. Новітньою тенденцією в судноплаванні є так зване «зелене судноплавання» – комплекс технологічних інновацій, який привів до розроблення суден, обладнання та пального, які більш безпечні екологічно [1; 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що рух навіть одного судна може істотно впливати на навколишнє середовище. Це пов'язано з наявністю

викидів в атмосферу вихлопних газів від роботи головних двигунів, дизель-генераторів, котельних установок, а також зі зміною енергетики акваторії під час руху великогабаритного тіла. Істотним є також вплив теплових скидів і гідрозумів від роботи рушійно-рульового комплексу тощо. Природно, що за збільшення кількості й тоннажності суден такі дії не можуть не викликати небажані антропогенні зміни навколишнього середовища [3].

З огляду на збільшення гідрологічного забруднення морських і річкових акваторій та водоохоронних зон істотно зросли вимоги до екологічної безпеки судноплавства. Міжнародною конвенцією щодо запобігання забрудненню із суден (далі – Конвенція МАРПОЛ) передбачено істотне зменшення норм викидів відпрацьованих газів судових енергоустановок. Набула чинності Міжнародна конвенція про контроль судових баластних вод та опадів та управління ними (Ballast Water Management Convention – BWMC) 2004 р., яка спрямована на запобігання переносу морських організмів у нові для них природні екосистеми разом із баластними водами суден. Міжнародною морською організацією введено заборону на використання такого, що не відповідає новим нормам, морського палива на борту суден.

Щоб у майбутньому дотримуватися встановлених екологічних стандартів для судноплавної галузі щодо захисту навколишнього середовища, необхідно прикласти багато зусиль і здійснити капіталовкладення в економіку судноплавства. Однак, незважаючи на те, що обговорення концепції «зеленого» судноплавства концентрується здебільшого на якості функціональної роботи суден, суднобудівний сектор також сприяє очищенню навколишнього середовища. Інвестиції та поліпшення технологій, а також регуляторний тиск і вимоги клієнтів сприяють побудові «зелених суден», які скорочують викиди вуглекислого газу та використовують енергію судових двигунів оптимально.

Формулювання цілей статті. Метою дослідження було здійснення аналізу можливостей застосування нових матеріалів, підвищення рівня енергоефективності судна, використання сучасних ефективних енергозберігаючих технологій у процесі створення суден, удосконалення енергоустановок судна, які відповідають новим вимогам екологічних стандартів і зменшують обсяг шкідливих викидів, розроблення екологічного та альтернативних видів палива, створення «екосуден».

Виклад основного матеріалу.

Застосування композитних матеріалів. Сучасний етап розвитку суднобудування характеризується дедалі ширшим застосуванням композитів для корпусів суден різного призначення. Відомо, що застосування в конструкції корпусу судна композитів дає можливість значно скоротити терміни будівництва порівняно з традиційними матеріалами. Крім того, воно допускає використання істотно менш кваліфікованої та дешевшої робочої сили, ніж та, яка потрібна для побудови суден із традиційних матеріалів. Усе це зумовлює серйозну економічну мотивацію масової побудови суден із композитів [4]. Тому сьогодні більшу частину світового малотоннажного флоту становлять судна, що мають корпуси з неметалевих композитів. Наприклад, тільки в Японії в експлуатації перебуває більше трьохсот тисяч промислових суден із полімерних композитів різних типів.

Застосування композитів дає змогу створювати судна з високими аеро- й гідродинамічними характеристиками, з легкими надбудовами, ефектним дизайном

зовнішнього вигляду та низкою інших переваг. Завдяки композитам знижується загальна вага порівняно з металевими (сталевими) суднами (на 25–30 %), при цьому зменшується вартість елементів конструкцій (на 30–40 %) [5]. Із цього постає низка додаткових переваг: знижені експлуатаційні витрати, мала емісія газів, що викликають парниковий ефект, і значна економія палива. З'являється можливість за допомогою композитів усунути необхідність застосування скріплюючих елементів під час з'єднання деталей, що також сприяє зниженню ваги. Композити надають архітекторам неймовірну свободу дизайну, дають можливість виготовляти деталі складної форми. Крім того, якщо ми порівняємо композити з конкуруючими матеріалами, то побачимо, що ціна терміну служби в композитного виробу значно нижча, ніж у металевому, завдяки малим витратам на технічне обслуговування, установку та складання, які зумовлені корозійною стійкістю і міцністю.

Конструкція суднових корпусів із композитів у міру накопичення досвіду проектування, будівництва та експлуатації суден із цих матеріалів стала істотно відрізнятися від конструкції корпусів суден, які виготовлені з традиційних матеріалів, особливо у швидкісному малотоннажному суднобудуванні. Основні питання, що виникають під час проектування суден такого типу, за кордоном мають нормативне обґрунтування.

На зростаючому ринку суднобудівних композитів спостерігаються тенденції використання нових матеріалів і технологій. Постачальники сировини знову почали активно розвивати біосмоли, натуральні волокна, поліефіри з малою емісією шкідливих речовин, позаавтоклавні препреги, сендвіч-композити, а також склорогожі та скломати. Усе це зумовлене необхідністю підвищити перероблюваність і відновлюваність матеріалів, знизити вміст стиролу, поліпшити якість поверхні готових виробів.

Виготовлення більших, ніж судна промислового призначення, суден також вимагатиме використання значної кількості передових матеріалів, таких як вуглепластик та органопластик, нейлон, армований скловолокном, надміцний поліетилен HDPE (поліетилен високої щільності й низького тиску), композиції ламінату з кевлара та скломатеріалів, які нині зазнають поширення у світовій суднобудівній практиці [5; 6].

В умовах посилення вимог щодо екологічності суден нових поколінь зростає значення композитів як багатофункціональних теплозвукоізоляційних матеріалів і покриттів для облаштування суднових приміщень. Мала щільність матеріалів дає змогу застосовувати їх в архітектурі надводної частини суден усіх типів, що сприяє поліпшенню стійкості, зменшенню радіолокаційної помітності суден, полегшенню експлуатації корпусу.

Вітчизняний досвід проектування суден із композитів обмежується кількома десятками проектів суден, а також невеликих катерів і мотолодок. Водночас у світі щорічно створюється безліч проектів суден із композитів переважно цивільного призначення, що свідчить про те, що суднобудування є сферою, у якій композити застосовуються давно з високою економічною ефективністю виробництв таких суден, потреба в яких є і в Україні.

У процесі проектування сучасних суден із композитів у нашій країні важливо якомога ширше використовувати досвід зарубіжних країн, де ця галузь традиційно добре розвинена.

Оптимізація обводів корпусів суден. У світовій практиці проектування суден використовуються нормативні документи та рекомендації, що враховують багаторічний досвід експлуатації суден різних типів у різних умовах, експериментальні дані, а також теоретичні дослідження для вирішення складного завдання з вибору таких характеристик корпусу, які задовольняли би численні й часом суперечливі вимоги стосовно ходовості, міцності, мореплавства тощо [7]. Похибки в оцінці тих чи інших якостей судна призводять до проектних помилок, зниження безпеки плавання, погіршення економічності та екологічних стандартів.

З позиції процесів системної інтеграції можна розглядати підхід до проектування як до замкнутої системи інженерно-технічних рішень, яка включає такі блоки досліджень під час проектування судна:

- оптимізацію приватних технічних рішень, що допускають їх математичну формалізацію або експериментальну перевірку;
- евристичні методи пошуку технічних рішень, що спираються на досвід експлуатації морських суден у складних умовах плавання;
- розроблення правил судноводіння та експлуатації судових пристроїв, особливо в тих випадках, коли у проекті допускаються обмеження в особливих умовах плавання.

Нині необхідно вирішити низку проблем як щодо визначення структури всього процесу проектування, так і стосовно вдосконалення проектних характеристик суден та їх оптимізації. Необхідне розроблення способів проектного обґрунтування таких суден, що враховують різні аспекти їх подальшої експлуатації (як економічні, так і екологічні) та забезпечують їх конкурентоспроможність.

Як приклад можна розглядати конструкцію судових корпусів із композитів – вона стала істотно відрізнятися від конструкції корпусів суден, які виготовлені з традиційних матеріалів, особливо у швидкісному малотоннажному суднобудуванні. Складність обводів підводної частини корпусу судна значною мірою визначається технологічними можливостями обробки матеріалів, які застосовуються для виготовлення корпусу [8]. Композити мають безумовну перевагу над усіма традиційними суднобудівними матеріалами, тому судна з композитів характеризуються більш досконалими формами обтічної частини корпусу та зниженою шорсткістю її поверхні (див. рис. 1). Це дає змогу істотно знижувати небажані антропогенні зміни навколишнього середовища.

Використання енергії вітру. Вітрила використовуються людством для управління рухом морських суден із давніх часів, проте з розвитком інших технологій вони відійшли на другий план – транспортні та пасажирські великі судна для морських перевезень уже давно використовують двигуни, які працюють на паливі. Натомість через дедалі більш очевидне забруднення навколишнього середовища та пов'язані із цим зміни клімату низка компаній знову працює над тим, щоб повернути вітрила в комерційне суднобудування.

Класифікаційне товариство DNV GL (Det Norske Veritas & Germanischer Lloyd) оцінило можливості використання в комерційному судноплаванні як допоміжного рушія шести типів вітрил, що розроблені різними міжнародними компаніями для досягнення цілей, які поставлені Міжнародною морською організацією з досягнення в майбутньому нульових рівнів викидів вуглецю від судноплавання.



Рис. 1. Експериментальне судно Sea Jet із композитних матеріалів

Майже в усіх типах вітрил діє один фізичний принцип: вітер тисне на передню кромку вітрила, розділяючись на два окремі потоки, які перенаправляються та рухаються з різними швидкостями до задньої кромки. У результаті перепад тиску одночасно тягне та штовхає вітрило й судно вперед. Єдине, що змінилося, – це ефективність вітрил, матеріали, з яких вони зроблені, а також їх обробка та управління ними.

У дослідженні розглянуто декілька наявних технологій: роторний парус (MariGreen, NorsePower – використовуються на 5 суднах), вітрила з трьох жорстких лопатей (консорціум Windship), крилові вітрила DynaRig (Dykstra Naval Architects), звичайні м'які вітрила (NEOLINE), лопатеві м'які вітрила OceanWings, які випробувані на яхті Energy Observer (французькі компанії CNIM та VPLP пропонують їх для використання на вантажних суднах), аеродинамічні вітрила Ventifoil (eConowind).

На цей час найбільш поширена технологія роторного вітрила (Rotor Sails). Роторні вітрила – це модернізована версія ротора Флетнера для забезпечення допоміжної вітрової тяги до потужності двигуна.

У 2021 р. фінська інжинірингова компанія Norsepower встановила систему роторних вітрил на рудовоз «Sea Zhoushan». Можна зазначити, що «Sea Zhoushan» – це перший балкер дедвейтом 325000 тонн, який буде оснащений роторними вітрилами (див. рис. 2). Встановлення роторних вітрил на перший рудовоз типорозміру VLOC (Very Large Ore Carrier) демонструє, що технологія Rotor Sails адаптується до різних робочих профілів і типів суден.

Установка включає п'ять роторних вітрил висотою 24 метри та діаметром 4 метри, які можна нахилити за допомогою гідроциліндрів. Ротори складаються, що не створює перешкод під час вантажно-розвантажувальних робіт. Сьогодні Rotor Sails використовуються для оптимізації паливної економічності та скорочення викидів вуглецю.

Дослідження Ю. С. Крючкова показали, що судно з вітрилом можна представити у вигляді крильчатого або карусельного вітроводуна з нескінченним

діаметром колеса [9; 10]. У цьому випадку вітрило є найбільш досконалою лопатевою машиною з найвищим коефіцієнтом корисної дії, яка безпосередньо використовує енергію для руху. Водночас на судні з вітродвигуном енергія додатково втрачається у трансмісії та гребному гвинті, унаслідок чого для руху використовується значно менша частка енергії вітру.



Рис. 2. Балкер *Sea Zhoushan* дедвейтом 325000 тонн з 5 похилими роторними вітрилами

Тому на суднах, що приводяться в рух вітром, найбільш доцільно використовувати звичайні м'які, напівжорсткі та жорсткі вітрила (крила).

Варто зазначити, що за рахунок використання енергії вітру значно скорочується кількість шкідливих викидів щодо показників, звичайних для океанських вантажних суден із традиційними двигунами внутрішнього згоряння. Основний недолік вітрильників – порівняно мала швидкість пересування. Однак ця проблема зараз активно вирішується: для прискорення ходу, а також для підвищення рівня маневрування біля берега планується додатково оснащувати судна електричними моторами та сонячними батареями.

Використання екологічного та альтернативних видів палива. Проєкти екосуден. Морський транспорт вважається найбільш «брудним» за рівнем викидів токсичних речовин порівняно з іншими видами транспортних засобів. Основними токсичними речовинами, що визначають забруднення атмосфери відпрацьованими газами дизельних двигунів, є окис вуглецю CO, оксиди азоту NO_x та незгорілі вуглеводні C_nH_m , канцерогенні поліциклічні вуглеводні, сажа. За даними незалежних експертів, на частку комерційного судноплавства зараз припадає приблизно 2,5 % від світових викидів вуглекислого газу в атмосферу, 18–30 % від викидів оксидів азоту та 9 % – від оксидів сірки. Відповідність судового палива вимогам світових стандартів важлива як для безпечної експлуатації суден, здоров'я персоналу, так і для захисту навколишнього середовища [11].

Суднове паливо, яке використовується нині на судових енергетичних установках (високооберткових, середньооберткових і низькооберткових двигунах

внутрішнього згоряння), за своїми характеристиками поділяється на два види: легке та важке. До важкого палива належить флотський мазут (його ще називають залишковим важким паливом), а до легкого палива – суднове малов'язке паливо (СМТ, ТСМ) або солярку флотську, які застосовуються на судах, що обладнані високообертovими й середньообертovими двигунами [12].

Суднове малов'язке паливо порівняно з мазутом є більш екологічним паливом. Його обов'язково використовують у зонах контролю викидів ЕСА (Emission Control Areas), проте за умови виходу у відкритий океан судна переходять на мазут як на більш дешеве паливо. За вимогами Конвенції МАРПОЛ морське судноплавство має в найближчому майбутньому відмовитися від використання важкого мазуту, хоча в цій сфері зміни відбуваються повільно.

Як відомо, однією з основних проблем забруднення від судноплавства є високий вміст сірки в судновому паливі. Міжнародна морська організація запропонувала суворе регулювання рівнів сірки в паливі шляхом створення спеціальних зон контролю викидів SECA (Sulfur Emission Control Areas), де суднам дозволено використовувати тільки паливо з низьким вмістом сірки (0,1 %), а з 2020 р. суднам, які плавають в інших районах, необхідно буде використовувати паливо з вмістом сірки менше 0,5 %. Якщо паливо з низьким вмістом сірки не використовується, необхідно встановити системи фільтрації сірчистих сполук у вихлопному газі (скрубери) для видалення викидів SO_x .

На думку незалежних експертів, ці правила означають, що 70 % палива, яке нині використовується в морському секторі, необхідно модифікувати або змінити. Також треба враховувати, що в короткостроковій перспективі здійснюватиметься регулювання викидів парникових газів (CO_2).

На сьогодні паливо з низьким вмістом сірки, яке впроваджується в морському секторі, має маркування «VLSFO» (Very-Low Sulphur Fuel Oil) – мазут із дуже низьким вмістом сірки, який має від 0,1 % до 0,5 % сірки, і «ULSFO» (Ultra Low Sulphur Fuel Oil) – мазут із наднизьким вмістом сірки, що містить менше 0,1 % сірки. Воно відповідає обмеженням зон SECA [13].

Міжнародні ініціативи зі зниження шкідливих викидів із суден є драйверами пошуку альтернативних видів палива, серед яких зараз найбільш поширеними є зріджений природний газ (далі – ЗПГ), зріджений вуглеводневий газ, метанол, біопаливо та водень. Інші види палива, які можуть відігравати певну роль у майбутньому, – це зріджений нафтовий газ (LPG), етанол, диметиловий ефір (DME), біогаз, синтетичне паливо, водень (особливо для використання в паливних елементах) та ядерне паливо [13].

ЗПГ – найбільш вигідний з економічної та екологічної позицій аналог флотського мазуту. Спалювання газу виробляє до 90 % менше шкідливих викидів, він відповідає вимогам Конвенції МАРПОЛ за вмістом сірки та за концентрацією сполучень азоту. Однак незгорілий метан, що є основним складником ЗПГ, створює викиди з більш потужним парниковим ефектом, ніж двоокис вуглецю (CO_2). Проте, за запевненнями виробників двопаливних двигунів, обсяг незгорілого метану в сучасному обладнанні не настільки великий, тому використання таких двигунів дає зниження парникових газів у судноплавстві на 10–20 %. Однак не весь морський і річковий транспорт можна переобладнати для експлуатації на зрідженому газі як основному паливі. Традиційно його використовують танкери для

перевезення ЗПГ, де більшість перевізників користується двопаливними дизельними двигунами, які здатні споживати будь-яку комбінацію ЗПГ та бункерного палива. Застосування ЗПГ для внутрішнього судноплавства обмежене та здебільшого орієнтоване на випробування [14].

Ще одне рішення зі зниження викидів сірки – використання біопалива, яке має дуже низький рівень сірки та низькі викиди CO_2 , а тому є технічно життєздатним рішенням для палива, що відповідає вимогам VLSFO або ULSFO. Безпосередня проблема полягає в тому, що в судноплавному секторі мало знань про застосування біопалива як компонента паливних ресурсів.

Усі перелічені альтернативні види палива практично не містять сірку та можуть використовуватися розрізнено для повної заміни звичайно палива або в поєднанні зі звичайним судновим паливом на нафтовій основі, у такий спосіб покриваючи тільки частину потреби судна в енергії. Вибраний тип альтернативного палива та частка замінного звичайного палива матимуть прямий вплив на викиди судна, зокрема парникові гази, NO_x та SO_x . Однак однією загальною проблемою, яка пов'язана з прийняттям для використання більшості альтернативних видів палива, є їхні фізико-хімічні характеристики, пов'язані, як правило, з відповідними низькими точками займання, більш високою летючістю, різним вмістом енергії на одиницю маси, у деяких випадках навіть токсичністю.

Однак з огляду на те, що судноплавство сьогодні становить значну частку на світовому транспортному ринку, використання альтернативних видів палива можна розглядати як одну з найважливіших сфер технологічного розвитку сталого транспорту з безпосереднім позитивним впливом на навколишнє середовище [15; 16].

Ще однією з помітних тенденцій у «зеленому суднобудуванні» є підвищене застосування суднобудівними верфями енергозберігаючих технологій, що запобігають втратам енергії, не знижуючи при цьому ефективність суден [17]. Значний прогрес у впровадженні енергозберігаючих методик і створенні суден, які відповідають високим екологічним стандартам та скорочують викиди вуглекислого газу в атмосферу, зробили японські суднобудівники. У Японії були створені та введені в дію правила, які встановлюють межі вмісту сірки в пальному та вимагають від суден, що проходять у японських територіальних водах, використовувати двигуни, які відповідають найбільш передовим стандартам за викидами оксидів азоту і вмістом сірки. Такі зусилля привели до розроблення революційного прибережного «суперекосудна», яке побудоване з використанням високотехнологічних рішень та обладнання, оснащене електричною енергетичною установкою, що дає можливість скоротити вплив на навколишнє середовище оксидів азоту, вуглекислого газу, оксидів сірки, звукового забруднення й вібрацій. Судно має оптимальну форму корпусу та полегшуючу систему підтримки для швартування, навантаження й навігації. На цей час декілька «суперекосуден» уже знаходяться в роботі, інші ж на стадії будівництва [18].

Для посилення безпеки та екологічної нешкідливості роботи верфей у Японії також розроблені відповідні рекомендації щодо інвентаризації та екологічно безпечних практик зламу суден.

У зв'язку з введенням у дію Міжнародною морською організацією документа BWMC з дуже жорсткими вимогами до обробки баластної води (основною небезпекою використання баластної води вважається вплив на екологію за рахунок перенесення морських організмів із баластною водою з однієї екосистеми в іншу)

актуальною стає тема розроблення безбаластних (free-ballast) суден, а також суден, у проєктах яких не відмовляються повністю від використання баластної води, проте зводять її кількість до мінімуму (low-ballast).

Так, класифікаційне товариство DNV GL розробило проєкт судна з проточним баластом Triality як альтернативи системам очищення баластної води для танкерів. Такі розробки ведуться і в Японії (будівництво безбаластного судна-бункерувальника ЗПГ), яка прагне зробити свою суднобудівну галузь екологічно стабільною та стійкою.

Висновки. У результаті проведеного дослідження тенденцій «зеленого судноплавства» – комплексу технологічних інновацій, які забезпечують створення та впровадження суден, обладнання й пального, що більш безпечні екологічно, – обґрунтовано раціональність проведення розробок у таких сферах:

- виготовлення та класифікації нових матеріалів і технологій із використанням композитів для корпусів суден, а також як багатофункціональних теплозвукоізоляційних матеріалів і покриттів;
- оптимізації обводів корпусів зі зміною дизайну та конструктивних особливостей судна;
- використання енергії вітру для підвищення рівня енергоефективності судна за рахунок встановлення вітрил різної конструкції;
- удосконалення та впровадження наявного досвіду щодо розроблення й використання екологічного та альтернативних видів палива, зменшення негативного впливу викидів із суден на навколишнє середовище;
- побудови «екосуден» за принципами «зеленої логістики» та введення в дію екологічно безпечних практик зламу суден, що дає змогу скоротити відходи й забруднення на всьому ланцюжку виробництва та поставок.

ЛІТЕРАТУРА

1. Индустрия 4.0: семь фактов / Siemens PLM Software. *PLM Эксперт: инновации в промышленности*. 2017. № 9. С. 34–37.
2. Скаридов А. С. «Зеленое судоходство» и проблема устойчивого использования морского транспорта. *Международное право и международные организации / International Law and International Organizations*. 2021. № 1. С. 31–45.
3. Ребрушкин М. Н., Васильев С. А., Пачурин Г. В. Повышение экологичности работы судов внутреннего и смешанного плавания. *Фундаментальные исследования*. 2012. № 6-1. С. 167–172.
4. Гуменюк Н. С., Грушин С. С. Применение композитных материалов в судостроении. *Современные наукоемкие технологии*. 2013. № 8-1. С. 116–117.
5. Мишкин С. И., Дориомедов М. С., Кучеровский А. И. Полимерные композиционные материалы в судостроении. *Новости материаловедения. Наука и техника*. 2017. № 1 (25). С. 60–70.
6. Kuperman A. M., Gorbatkina Y. A., Turusov R. A. High-strength reinforced plastics. *Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10 «Инновационная деятельность»*. 2015. № 2 (17). С. 29–42.

7. Храмушин В. Н. Исследования по оптимизации формы корпуса корабля. *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. 2003. № 1 (107). С. 50–65.
8. Францев М. Э. Проектные особенности зарубежных промысловых судов из композиционных материалов для прибрежного лова. *Судо-строение*. 2010. № 5. С. 14–18.
9. Крючков Ю. С., Перестюк И. Е. Крылья океана. Ленинград : Судостроение, 1983. 256 с.
10. Крючков Ю. С. Механика парусного судна : монография. Николаев : Степь-инфо, 2005. 40 с.
11. Иванченко А. А., Петров А. П., Живлюк Г. Е. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов. *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. 2015. № 3 (31). С. 103–112.
12. Демидова Н. П., Марченко А. А., Онищенко О. А. Основные показатели судового топлива и их основные эксплуатационные свойства. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. 2015. № 32. С. 6–11.
13. Карпенко А. А., Копцева Е. П. Перспективы перевода судов морского и речного транспорта на альтернативные виды топлива. *Транспортное дело России*. 2017. № 3. С. 63–66.
14. Экономические предпосылки использования СПГ в качестве моторного топлива: аналитический обзор. *Транспорт на альтернативном топливе*. 2018. № 6 (66). С. 25–30.
15. Хорошев В. Г., Попов Л. Н., Гатин Р. И. Перспективы использования альтернативных видов топлива в судовых энергетических установках. *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2019. № 4 (390). С. 194–202.
16. Судовое топливо будущего. Сравнение и перспективы. URL: <https://pro-arctic.ru/18/06/2018/technology/32545>
17. Руководство по экологическим и социальным вопросам по отраслям для судостроения и судостроительных заводов / Европейский банк реконструкции и развития. 2011. URL: https://www.ebrd.com/downloads/about/sustainability/Shipbuilding_and_Shipyards_RU.pdf
18. От судоверфей к морям: зеленые тенденции в судостроении. *MaritimeZone*. 2010. URL: <https://maritime-zone.com/news/view/green-features-in-shipbuilding>

REFERENCES

1. Siemens PLM Software (2017). Industry 4.0: seven facts [Industriya 4.0: sem' faktov]. *PLM Ekspert: innovatsii v promyshlennosti – PLM Expert: Industry Innovation*, no. 9, pp. 34–37. [in Russian]
2. Skaridov, A. S. (2021). “Green shipping” and the problem of sustainable use of maritime transport [“Zelenoe sudokhodstvo” i problema ustoychivogo ispol'zovaniya morskogo transporta]. *Mezhdunarodnoe*

- pravo i mezhdunarodnye organizatsii – International Law and International Organizations*, no. 1, pp. 31–45. [in Russian]
3. Rebrushkin, M. N., Vasil'ev, S. A., Pachurin, G. V. (2012). Improving the environmental friendliness of the operation of inland and mixed navigation vessels [Povyshenie ekologichnosti raboty sudov vnutrennego i smeshannogo plavaniya]. *Fundamental'nye issledovaniya – Basic Research*, no. 6-1, pp. 167–172. [in Russian]
 4. Gumenyuk, N. S., Grushin, S. S. (2013). The use of composite materials in shipbuilding [Primenenie kompozitnykh materialov v sudostroenii]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii – Modern high technologies*, no. 8-1, pp. 116–117. [in Russian]
 5. Mishkin, S. I., Doriomedov, M. S., Kucherovskiy, A. I. (2017). Polymer composite materials in shipbuilding [Polimernye kompozitsionnye materialy v sudostroenii]. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika – Polymer composite materials in shipbuilding. News of materials science. Science and technology*, no. 1 (25), pp. 60–70. [in Russian]
 6. Kuperman, A. M., Gorbatkina, Y. A., Turusov, R. A. (2015). High-strength reinforced plastics. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 10 “Innovatsionnaya deyatel'nost'” – Bulletin of the Volgograd State University. Series 10 “Innovation”*, no. 2 (17), pp. 29–42. [in English]
 7. Khramushin, V. N. (2003). Research to optimize the shape of the ship's hull [Issledovaniya po optimizatsii formy korpusa korablya]. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk – Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, no. 1 (107), pp. 50–65. [in Russian]
 8. Frantsev, M. E. (2010). Design features of foreign fishing vessels made of composite materials for coastal fishing [Proektnye osobennosti zarubezhnykh promyslovykh sudov iz kompozitsionnykh materialov dlya pribreznogo lova]. *Sudostroenie – Shipbuilding*, no. 5, pp. 14–18. [in Russian]
 9. Kryuchkov, Yu. S., Perestyuk, I. E. (1983). Wings of the ocean [Kryl'ya okeana]. Leningrad : Sudostroenie. [in Russian]
 10. Kryuchkov, Yu. S. (2005). Mechanics of a sailing ship: monograph [Mekhanika parusnogo sudna: monografiya]. Mykolaiv : Step'-info. [in Russian]
 11. Ivanchenko, A. A., Petrov, A. P., Zhivlyuk, G. E. (2015). Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions [Energeticheskaya effektivnost' sudov i reglamentatsiya vybrosov parnikovyykh gazov]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova – Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov*, no. 3 (31), pp. 103–112. [in Russian]
 12. Demidova, N. P., Marchenko, A. A., Onishchenko, O. A. (2015). The main indicators of marine fuel and their main operational properties [Osnovnye

- pokazateli sudovogo topliva i ikh osnovnye ekspluatatsionnye svoystva]. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Kamchatka State Technical University*, no. 32, pp. 6–11. [in Russian]
13. Karpenko, A. A., Koptseva, E. P. (2017). Prospects for the transfer of sea and river transport vessels to alternative fuels [Perspektivy perevoda sudov morskogo i rechnogo transporta na al'ternativnye vidy topliva]. *Transportnoe delo Rossii – Transport business in Russia*, no. 3, pp. 63–66. [in Russian]
 14. Economic prerequisites for the use of LNG as a motor fuel: an analytical review [Ekonomicheskie predposylki ispol'zovaniya SPG v kachestve motornogo topliva: analiticheskiy obzor] (2018). *Transport na al'ternativnom toplive – Alternative fuel transport*, no. 6 (66), pp. 25–30. [in Russian]
 15. Khoroshev, V. G., Popov, L. N., Gatin, R. I. (2019). Prospects for the use of alternative fuels in ship power plants [Perspektivy ispol'zovaniya al'ternativnykh vidov topliva v sudovykh energeticheskikh ustanovkakh]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra – Proceedings of the Krylovsky State Scientific Center*, no. 4 (390), pp. 194–202. [in Russian]
 16. Marine fuel of the future. Comparison and perspectives [Sudovoe toplivo budushchego. Sravnenie i perspektivy]. Retrieved from: <https://pro-arctic.ru/18/06/2018/technology/32545> [in Russian]
 17. European Bank for Reconstruction and Development (2011). Environmental and social guidelines by industry for shipbuilding and shipyards [Rukovodstvo po ekologicheskim i sotsial'nym voprosam po otraslyam dlya sudostroeniya i sudostroitel'nykh zavodov]. Retrieved from: https://www.ebrd.com/downloads/about/sustainability/Shipbuilding_and_Shipyards_RU.pdf [in Russian]
 18. From shipyards to the seas: green trends in shipbuilding [Ot sudoverfey k moryam: zelenye tendentsii v sudostroenii] (2010). *MaritimeZone*. Retrieved from: <https://maritime-zone.com/news/view/green-features-in-shipbuilding> [in Russian]

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656.022

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.1-12.10>

ІМОВІРНІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МУЛЬТИМОДАЛЬНОЇ ДОСТАВКИ

В.В. Берестенко¹, С.П. Онищенко²

¹аспірант кафедри «Експлуатація флоту та технології морських перевезень»,
Одеський національний морський університет

²д. е. н., професор, директор Навчально-наукового інституту морського бізнесу,
Одеський національний морський університет
ORCID ID: 0000-0002-7528-4939

Анотація

Вступ. Щорічне зростання обсягу мультимодальних перевезень зумовлює привабливість такого сегменту ринку транспортних послуг, тому значна кількість компаній готова нині надати послуги мультимодального перевезення, що зумовлює, з одного боку, високий рівень конкуренції у цьому секторі ринку, з іншого – високі вимоги вантажовласників. Тому для забезпечення конкурентоспроможності мультимодальних операторів потрібні значні зусилля та високий рівень сервісу. **Метою** дослідження є формування множини показників оцінки ймовірнісних характеристик мультимодальних доставок для забезпечення всебічної оцінки варіантів доставки у процесах оптимізації та/або відбору. **Результати.** В рамках цього дослідження запропоновано показники оцінки ймовірнісних характеристик мультимодальної доставки – надійності та можливого збільшення часу. Для оцінки характеристик мультимодальної доставки пропонується використовувати сітковий графік, який надає сукупність та логічну послідовність операцій, які пов'язані з мультимодальною доставкою, як основних, так і додаткових. Кожна операція транспортно-технологічного процесу, у тому числі й операції критичного шляху в рамках сіткової моделі, характеризується ймовірнісною природою їхньої тривалості. Проведено статистичні дослідження поведінки окремих операцій транспортно-технологічного процесу в рамках мультимодальної доставки, обґрунтовано нормальний закон розподілу, що підтверджує результати інших досліджень з цього напрямку. Методи оцінки враховують різні підходи до визначення планового часу виконання операцій (середнє значення або значення, гарантоване з певною ймовірністю), а також можливість оцінки заданого рівня ймовірності розгляду значень часу виконання операцій. **Висновки.** У сукупності з основними характеристиками доставки – вартості та часу – запропоновані характеристики формують базу оцінки альтернативних варіантів доставки. Зміна хоча б одного елемента в мультимодальній доставці призводить до зміни характеристик усієї доставки. Це використовується для коригування варіантів у процесі пошуку того, який би відповідав вимогам, що висуваються до доставки.

© Берестенко В.В., Онищенко С.П., 2022

Ключові слова: сіткова модель, надійність, час доставки, транспортно-технологічний процес, нормальний закон розподілу, мультимодальні перевезення, конкурентоспроможність мультимодальних операторів.

PROBABILISTIC CHARACTERISTICS OF MULTIMODAL SHIPPING

V.V. Berestenko¹, S.P. Onyshchenko²

¹Postgraduate of the Department “Fleet operation and shipping technologies”,
Odessa National Maritime University

²Doctor of Economics, Professor,
Director of Educational & Scientific Institute of Marine Business,
Odessa National Maritime University
ORCID ID: 0000-0002-7528-4939

Summary

Introduction. The annual growth of multimodal shipping determines the attractiveness of this transport market segment; thus, many companies are ready to provide multimodal shipping services, that leads, on the one hand, high level competition in this market sector; on the other hand, high level requirements of cargo owners. Therefore, to ensure the competitiveness the multimodal operators need significant efforts and a high-level service. **Purpose.** This study aims to form a set of indicators for estimating the multimodal shipping probabilistic characteristics to provide a comprehensive assessment of shipping options in the decision-making processes. **Results.** This study proposes methods for estimating the probabilistic characteristics of multimodal shipping – reliability and possible increase in time. To assess the characteristics of multimodal shipping, it is proposed to use a grid graph, which provides a set and logical sequence of operations related to multimodal delivery, both basic and additional. Each operation of the technological process, including critical path operations within the grid model, is characterized by the probabilistic nature of their duration. Statistical researches of some transportation operations duration behavior within the multimodal delivery system are carried out, the normal distribution that confirms results of other researches in the given direction is proved. Estimation methods take into account the different approaches to determining the planned operation duration (average value or value guaranteed with a certain probability), as well as the possibility to estimate the values of operation duration for given level of probability. **Conclusions.** Along with the main shipping characteristics – cost and time, characteristics proposed in this research form the basis for evaluating alternative shipping options. Changing at least one element in multimodal shipping causes the changes of the entire shipping characteristics. This is to be used to adjust the options in the decision-making process that meets all shipping requirements.

Key words: network model, reliability, shipping time, transport and technological process, normal distribution, multimodal shipping, multimodal operators' competitiveness.

Вступ. Мультимодальна доставка передбачає використання кількох видів транспорту, наявність єдиного перевізного документа та відповідно мультимодального оператора, який організовує цю доставку та несе за неї відповідальність.

Щорічне зростання обсягу мультимодальних перевезень зумовлює привабливість цього сегменту ринку транспортних послуг, тому значна кількість компаній готові нині надати послуги мультимодального перевезення, що зумовлює, з одного боку, високий рівень конкуренції у такому секторі ринку, з іншого – високі вимоги вантажовласників. Тому для забезпечення конкурентоспроможності мультимодальних операторів потрібні значні зусилля та високий рівень сервісу. Це передбачає під час надання послуг з організації мультимодальної доставки опрацювання множини альтернативних варіантів мультимодальної доставки та їхню всебічну оцінку для того, щоб вимоги вантажовласника (клієнта) за умовами доставки були виконані в повному обсязі.

Нині, крім традиційних характеристик доставки – вартості та часу, важливим критерієм є дотримання терміну доставки, що пов'язане з функціонуванням глобальних систем логістики.

Постановка проблеми. Отже, виникає необхідність у розробці методів оцінки надійності доставки, а також інших показників імовірнісних характеристик мультимодальної доставки. Це дозволить всебічно оцінювати варіанти доставки й отримувати результати, що більшою мірою відповідають вимогам вантажовласників. Це дозволить підвищити рівень сервісу мультимодальних операторів та, як наслідок, забезпечить їх конкурентоспроможність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема мультимодальних перевезень присвячено, з одного боку, достатню кількість робіт, з іншого боку, слід констатувати, що ці роботи переважно засновані на детерміністському підході, тобто розглядають характеристики доставки як визначені значення.

Проте кожна операція транспортно-технологічного процесу, у тому числі й операції критичного шляху в рамках сіткової моделі, характеризуються імовірнісною природою їхньої тривалості [1–6]. Як правило (і на це вказують багато досліджень, наприклад [1; 2]), час виконання операцій підпорядковується нормальному закону розподілу, що за наявності статистичних даних дозволяє встановити параметри закону і визначити ймовірності діапазонів різних значень.

Сукупність та логічна послідовність операцій, які пов'язані з мультимодальною доставкою, може бути представлена у вигляді сіткової моделі, що було представлено у [7] як розвиток ідей, висловлених у [8–11].

Вибираючи найбільш підходящий варіант доставки з множини можливих альтернатив, оператор та замовник базуються на оцінці основних характеристик доставки – вартості та часу. Проте така характеристика, як, наприклад, надійність доставки, також може мати велике значення для вантажовласника [7; 11–13]. У роботах [14; 15] пропонується використовувати імовірнісні характеристики у разі вибору варіанта доставки вантажів, використовується поняття «ризик доставки». Проте слід констатувати, що відсутні методи оцінки пропонуємих імовірнісних характеристик, надійність доставки в багатьох джерелах пропонується оцінювати експертним шляхом (аналог імовірності).

Ціль статті. Метою цього дослідження є формування множини показників оцінки імовірнісних характеристик мультимодальних доставок для забезпечення всебічної оцінки варіантів доставки у процесах оптимізації та відбору.

Результати. У рамках сіткової моделі, що відображає логічну послідовність операцій, можуть бути виділені основні транспортні операції, які пов'язані

безпосередньо з фізичним переміщенням вантажу, а також додаткові операції, які мають організаційний характер [15]. Поєднання часової осі, схеми фізичного переміщення вантажу та операцій транспортно-технологічного процесу (сіткового графіка) (рис. 1) дає можливість продемонструвати сказане вище.

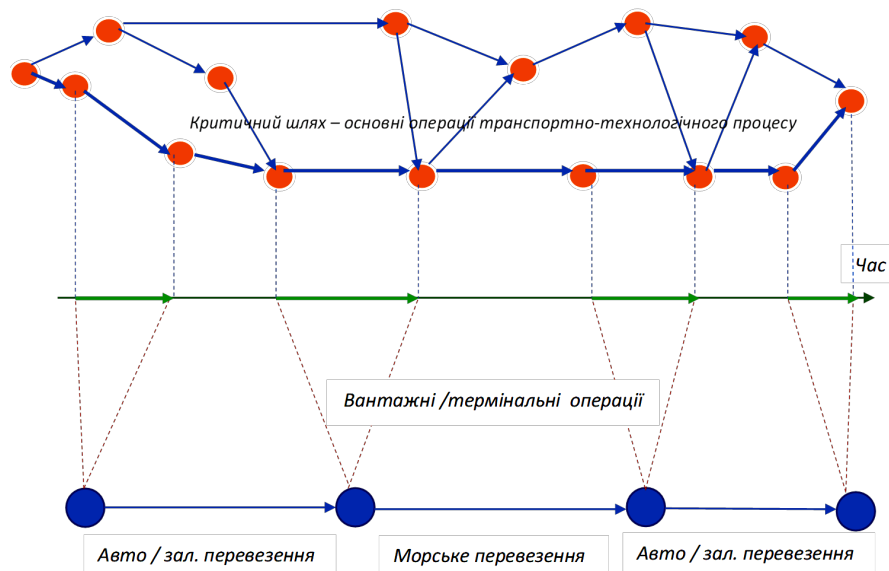


Рис. 1. Поєднання сіткового графіка транспортно-технологічного процесу та фізичного переміщення вантажу із часовою віссю

Як правило, для контейнерних перевезень основні операції критичного шляху сіткового графіка – це операції, які пов’язані з фізичним переміщенням вантажу, оскільки більшість інших операцій відбуваються паралельно з процесом переміщення (крім операцій із підготовки до доставки). Виняток становлять митні та інші формальності у морських портах у разі доставки імпортованих вантажів.

Кожна операція транспортно-технологічного процесу, у тому числі й операції критичного шляху в рамках сіткової моделі, характеризується імовірнісною природою її тривалості. Вище вже акцентувалося на тому, що здебільшого час виконання транспортних операцій підпорядковується нормальному закону розподілу, що за наявності статистичних даних дозволяє встановити параметри закону та визначити ймовірності діапазонів різних значень.

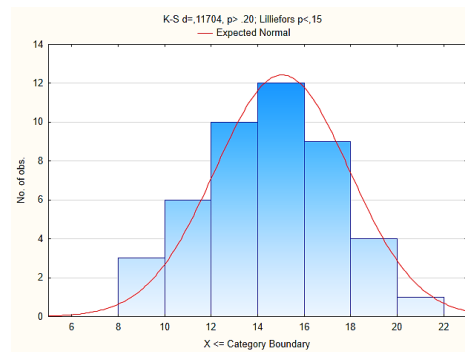
На базі інформації про тривалість розвантаження суден-контейнеровозів в Одеському порту та тривалість формальностей, які пов’язані з проходженням імпортованих вантажів у контейнерах через Одеський порт, були отримані такі результати (фрагмент представлений на рис. 2), які наочно демонструють несуперечність вихідних даних гіпотезі про нормальний закон розподілу.

Отже, з урахуванням вищезазначеного фактичний час мультимодальної доставки:

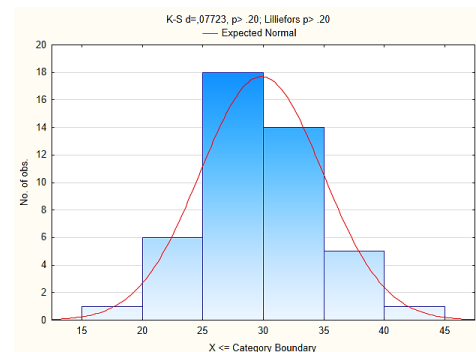
$$T_{\text{факт}} = \sum_{v \in \Omega_{kp}} T_v^{\text{факт}}, \quad (1)$$

де $\Omega_{кр} \subset \Omega$ – множина критичних операцій у рамках сіткового графіка доставки вантажу, Ω – множина всіх операцій, $T_v^{факт}$ – фактичний час виконання операцій критичного шляху мережного графіка транспортно-технологічного процесу. Дано таке трактування поняття «надійність доставки» – це ймовірність того, що фактичний час доставки не перевищить запланований (очікуваний). З урахуванням (1):

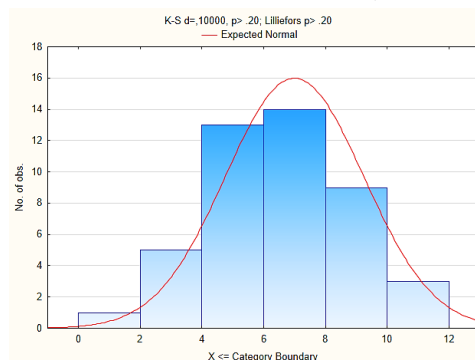
$$I = P(T^{факт} \leq T) = P\left(\sum_{v \in \Omega_{кр}} T_v^{факт} \leq \sum_{v \in \Omega_{кр}} T_v\right). \quad (2)$$



а) час вантажних операцій для суден до 160 м;



б) час вантажних операцій для суден від 160 м до 240 м;



в) тривалість формальностей для імпортованих вантажів у контейнерах

Рис. 2. Фрагмент статистичних досліджень часу виконання операцій мультимодальної доставки

Тривалість кожної операції критичного шляху процесу доставки вантажу у контейнері є незалежною випадковою величиною. Оскільки йдеться про твори подій (незалежних подій), кожна з яких пов'язана з тим, що $T_v^{факт} \leq T_v$, то як оцінка надійності може бути прийнята величина:

$$I^d = \prod_{v \in \Omega_{кр}} P(T_v^{факт} \leq T_v). \quad (3)$$

Природно, що (2) і (3) не є математично рівноцінними, але, по суті транспортно-технологічного процесу доставки вантажу в контейнерах, величина T

визначається як сума тривалостей операцій критичного шляху (1), тому надійність пов'язана з надійністю кожної компоненти критичного шляху процесу доставки $I_v = P(T_v^{\text{факт}} \leq T_v)$, $v \in \Omega_{кр}$, а (3) відповідає інтегральній сутності часу доставки. Тому надалі саме (3) буде використано як оцінку надійності доставки. Для практичного використання (3) необхідно знати, що саме приймається як планована тривалість операцій, T_v – це середнє значення, або це значення, гарантоване з певною ймовірністю (рис. 3).

Але, як правило, мультимодальні оператори мають статистику на базі наявного досвіду, що дозволяє оцінити компоненти (3) для кожної конкретної доставки. Якщо T_v – це середнє значення (рис. 3, а), то з ймовірністю $P = 0,5$ виконується умова $T_v^{\text{факт}} \leq T_v$, якщо в якості T_v приймається значення, наприклад, для якого $P(T_v^{\text{факт}} > T_v) = 0,1$ (рис. 3, б), то $P(T_v^{\text{факт}} \leq T_v) = 0,9$.

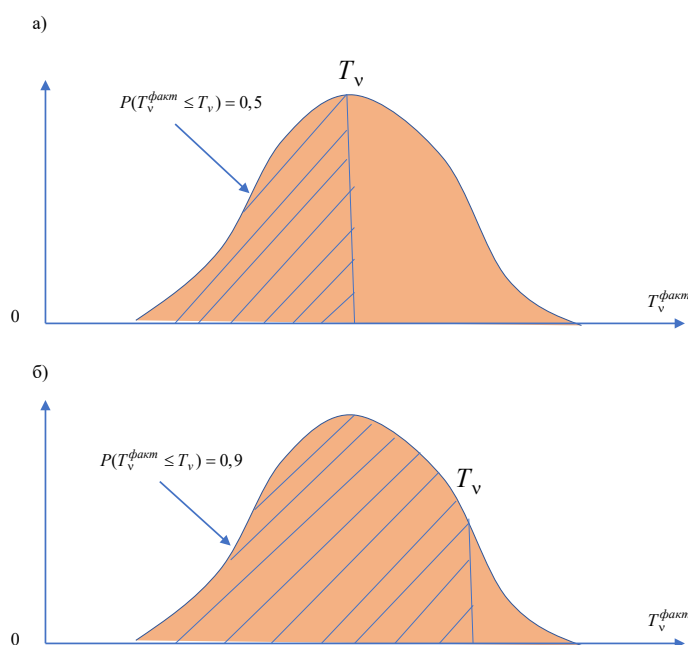


Рис. 3. Схематичне зображення оцінки надійності елемента мультимодальної доставки за допомогою щільності розподілу ймовірностей $T_v^{\text{факт}}$

Зазначимо, що (2) може застосовуватися в тих випадках, коли йдеться про варіант доставки, який часто використовується, і можна оцінити на основі статистики ймовірність усієї системи інтегровано. Таким чином, залежно від наявних статистичних даних можуть бути застосовні або підхід (2), або (3).

Слід зазначити, що в багатьох практичних ситуаціях необхідно не тільки володіти інформацією про надійність того чи іншого елемента доставки та доставки загалом, а й про величину можливого збільшення часу операції та доставки загалом. Здебільшого знання того, наскільки може бути «зірваний» термін набагато навіть важливіше за абстрактне для практиків поняття «ймовірність». Тому що якщо надійність якогось елемента 0,75 (тобто не дуже висока і відповідає досить середньому рівню), але максимально можливе збільшення часу, наприклад, на

7 %, то це може виявитися цілком прийнятним, ніж більш «надійна» ймовірність елемента, але з 15 % є максимально можливим збільшенням часу.

Введемо до розгляду «можливе збільшення часу» ΔT_v для операції та доставки в цілому ΔT . Під цим терміном розумітимемо максимально можливе із заданою ймовірністю збільшення часу. Подібний підхід застосовувався до тривалості робіт у [16], що може бути адаптовано до транспортної сфери. Пояснимо це за допомогою рис. 4.

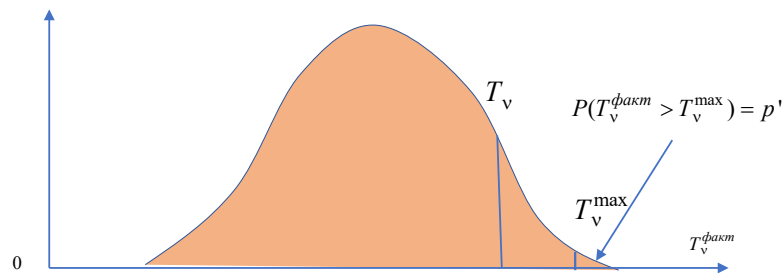


Рис. 4. Оцінка можливого збільшення часу операції (елемента мультимодальної доставки)

Як максимально можливий термін виконання операції прийматимемо таке значення T_v^{\max} , для якого виконано:

$$P(T_v^{\text{факт}} > T_v^{\max}) = p', \quad (4)$$

де як ймовірність приймаються значення $p' = \{0, 1; 0, 05; 0, 03; 0, 01\}$, що відповідає методам оцінки ризиків та обчисленням можливої величини відхилення для результату [16]. Таким чином, можливе збільшення часу для операції становить:

$$\Delta T_v = T_v^{\max} - T_v. \quad (5)$$

Діапазон можливих значень $T_v^{\text{факт}}$ визначається за властивостями нормального закону розподілу середньоквадратичним відхиленням σ_v^T або дисперсією $D_v^T = (\sigma_v^T)^2$ та, згідно з правилом «3 σ », з імовірністю 0,9972 значення лежать у межах $\pm 3\sigma$ від середнього значення; з імовірністю 0,9544 у межах $\pm 2\sigma$ від середнього значення.

Отже, як величину T_v^{\max} можна прийняти або $a_v^T + 2\sigma_v^T$, або $a_v^T + 3\sigma_v^T$, де a_v^T це середнє значення. Тоді

$$\Delta T_v = a_v^T + 2\sigma_v^T - T_v \text{ або } \Delta T_v = a_v^T + 3\sigma_v^T - T_v. \quad (6)$$

У ситуації, коли як величина T_v приймається середнє значення, тобто $T_v = a_v^T$, то:

$$T_v^{\max} = T_v + 2\sigma_v^T, \text{ або } T_v^{\max} = T_v + 3\sigma_v^T. \quad (7)$$

У першому випадку $p' \approx 0,05$, у другому $p' \leq 0,01$. При цьому:

$$\Delta T_v = 2\sigma_v^T \text{ або } \Delta T_v = 3\sigma_v^T. \quad (8)$$

Якщо необхідний розгляд інших варіантів p' або точне завдання $p' = \{0, 01; 0, 05\}$, то можна слідувати закономірностям нормального закону і, зокрема, отримати таке:

$$P(T_v^{факт} > T_v^{max}) = 0,5 - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{T_v^{max} - a_v^T}{\sigma_v^T}\right) = p', \quad (9)$$

$$T_v^{max} = a_v^T + k(p') \cdot \sigma_v^T, \quad (10)$$

де $\Phi(x)$ – функція Лапласа, $k(p')$ – коефіцієнт, що визначається на базі значень функції Лапласа для заданого p' . Зокрема, для $p' = 0,05$ $k(p') = 1,65$.

Зазначимо, що дослідження поведінки «порогових значень» та $k(p')$ наведено у [17] у рамках аналізу ризиків проєктів придбання суден.

Таким чином, з урахуванням вищевикладеного:

$$\Delta T_v = a_v^T + k(p') \cdot \sigma_v^T - T_v. \quad (11)$$

Якщо $T_v = a_v^T$, то:

$$\Delta T_v = k(p') \cdot \sigma_v^T. \quad (12)$$

Таким чином, з урахуванням прийнятих p' значення $T_v^{факт} > T_v^{max}$ розглядаються як практично неможливі, тому що їхня ймовірність досить мала.

Тоді для всієї мультимодальної доставки для заданого p' (тобто ймовірність значень, якими ми нехтуємо) можливе збільшення часу становить:

$$\Delta T = \sum_{v \in \Omega_v} \Delta T_v = \sum_{v \in \Omega_v} (a_v^T + k(p') \cdot \sigma_v^T - T_v). \quad (13)$$

У випадку $T_v = a_v^T$ (13) трансформується у:

$$\Delta T = \sum_{v \in \Omega_v} \Delta T_v = k(p') \sum_{v \in \Omega_v} \sigma_v^T. \quad (14)$$

Зазначимо, що можливе збільшення часу мультимодальної доставки базується на збільшенні часу операцій критичного шляху сіткової моделі доставки, що було обґрунтовано вище. У ситуаціях, коли збільшення часу за деякими некритичними операціями зачіпає загальну тривалість доставки (тобто перевищує резерви часу таких операцій), можна скористатися програмними засобами сіткового моделювання (наприклад, MS Project) для оцінки ΔT з урахуванням завдання кожної операції $\Delta T_l, l \in \Omega$.

Висновки. У рамках цього дослідження запропоновано методи оцінки ймовірних характеристик мультимодальної доставки – надійності та можливого збільшення часу. У сукупності з основними характеристиками доставки – вартості та часу – запропоновані характеристики формують базу оцінки альтернативних варіантів доставки. Зміна хоча б одного елемента в мультимодальній доставці призводить до зміни характеристик усієї доставки. Це використовується для коригування варіантів у процесі пошуку того, який би відповідав вимогам, що висуваються до доставки.

Вивчення альтернативних варіантів доставки є функцією мультимодального оператора, який, аналізуючи задані умови по вантажу та доставці, на базі інформації з контейнерних лінійних сервісів, умов залізниці, розкладу сервісів контейнерних поїздів, специфіки портів, формує альтернативні варіанти доставки. Слід зазначити, що характеристики різних варіантів доставки можуть значно відрізнятися, тому чим більше критеріїв оцінки альтернативних варіантів буде використано в аналізі, тим більш всебічно їх можна буде оцінити.

ЛІТЕРАТУРА

1. Vonolfen S., Affenzeller M. Distribution of waiting time for dynamic pickup and delivery problems. *Annals of Operations Research*. 2016. No. 236 (2), pp. 359–382. URL: <https://doi.org/10.1007/s10479-014-1683-6>
2. Zhang Junlong & Lam William & Chen Bi Yu. On-time delivery probabilistic models for the vehicle routing problem with stochastic demands and time windows. *European Journal of Operational Research*. 2016. No. 249. Pp. 144–154. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.050>
3. Chen Dandan, Yong Zhang, Liangpeng Gao, and Russell G. Thompson. Optimizing Multimodal Transportation Routes Considering Container Use Sustainability. 2019. No. 11, 19, p. 5320. URL: <https://doi.org/10.3390/su11195320>
4. Ferrucci F., Bock S., & Gendreau M. A pro-active real-time control approach for dynamic vehicle routing problems dealing with the delivery of urgent goods. *European Journal of Operational Research*, 2012. No. 225 (1), pp. 130–141. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.09.016>.
5. Gendreau M., & Potvin J. Issues in real-time fleet management. *Transportation Science*, 2004. No. 38 (4), pp. 397–398. URL: <http://www.jstor.org/stable/25769214>
6. Onyshchenko S. P., & Koskina Y. A. Estimation of the time of the vessel's arrival at port. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2019. No. 1 (79), pp. 39–50. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2019/158478>.
7. Берестенко В. В., Онищенко С. П. Характеристики мультимодальної доставки на базі сіткової моделі транспортних основних і додаткових операцій. *The 2nd International scientific and practical conference "Innovations and prospects of world science"* (October 6–8, 2021). Perfect Publishing, Vancouver, Canada, 2021. Pp. 158–162.
8. Коскіна Ю. О. Формалізація процесу організації системи доставки вантажів. *Наукоємні технології*, 2020. № 45 (1), с. 111–117. URL: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.45.14582>
9. Rusanova S., Onyshchenko S. Development of transport and technological process options' concept for goods delivery with participation of maritime transport. *Technology audit and production reserves*. 2020. No. 1 (2 (51)). URL: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.198373>
10. Павлова Н. Л. Сіткова модель процесу організації доставки вантажів у контейнерах. *Transport development*, № 2 (7), 2020. С. 52–59. URL: <https://doi.org/10.33082/td.2020.2-7.05>
11. Pavlova N., Onyshchenko S. Organization of transport company's project-oriented management (on the example of the freight forwarding company). *Management of Development of Complex Systems*, 2020. No. 42, pp. 23–28. URL: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.42.23-28>
12. Onyshchenko S. P., Smrkovska V. Yu. Modeling the process of forming integrated systems for the delivery of goods [Modelirovaniye protsessa formirovaniya integrirovannykh sistem dostavki gruzov]. *Vestnik ONMU, ONMU Bulletin*, 2010. No. 30, pp. 142–149.

13. Онищенко С. П., Коскіна Ю. О. Сутність, специфіка і формування систем доставки вантажів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2019. № 3, с. 86–95. URL: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-144-3-86-95>
14. Кічкіна О. І. Вибір оптимальної схеми доставки вантажу в логістичних системах. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, 2015. № 2, с. 9–11. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VISUNU_2015_2_3
15. Аулін В. В., Голуб Д. В., Гриньків А. В., Лисенко С. В. Методологічне обґрунтування дослідження та розв'язання проблеми надійності функціонування транспортних систем. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*, 2017. № 10, с. 29–36. URL: <http://dSPACE.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/9373>
16. Онищенко С. П., Шутенко Т. Н. Специфика рыночных рисков и мероприятия по их снижению в современном судоходном бизнесе. *Актуальні проблеми економіки*, 2012. № 2, с. 85–98.
17. Онищенко С. П., Корниец Т. Е. Оценка рыночного риска проектов приобретения судна. *Інноваційна економіка*, 2015. № 4, с. 198–205.

REFERENCES

1. Vonolfen, S., Affenzeller, M. (2016). Distribution of waiting time for dynamic pickup and delivery problems. *Annals of Operations Research*, 236 (2): 359–382. Retrieved from: <https://doi.org/10.1007/s10479-014-1683-6>
2. Zhang, Junlong & Lam, William & Chen, Bi Yu. (2016). On-time delivery probabilistic models for the vehicle routing problem with stochastic demands and time windows. *European Journal of Operational Research*. 249. 144–154. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.050>
3. Chen Dandan, Yong Zhang, Liangpeng Gao, and Russell G. Thompson (2019). Optimizing Multimodal Transportation Routes Considering Container Use Sustainability 11, 19: 5320. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/su11195320>
4. Ferrucci, F., Bock, S., & Gendreau, M. (2012). A pro-active real-time control approach for dynamic vehicle routing problems dealing with the delivery of urgent goods. *European Journal of Operational Research*, 225 (1), 130–141. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.09.016>
5. Gendreau, M., & Potvin, J. (2004). Issues in real-time fleet management. *Transportation Science*, 38 (4), 397–398. Retrieved from: <http://www.jstor.org/stable/25769214>
6. Onyshchenko, S. P., & Koskina, Y. A. (2019). Estimation of the time of the vessel's arrival at port. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 1 (79), 39–50. Retrieved from: <https://doi.org/10.15802/stp2019/158478>
7. Berestenko, V. V., Onyshchenko, S. P. (2021). Characteristics of multimodal delivery based on a network model of transport main and

- additional operations. *The 2nd International scientific and practical conference "Innovations and prospects of world science"* (October 6–8, 2021). Perfect Publishing, Vancouver, Canada, 158–162. [in Russian]
8. Koskina, Yu. O. (2020). Formalization of the process of organizing the delivery system [Formalizatsiya protsesu orhanizatsiyi systemy dostavky vantazhiv]. *Science-intensive technologies*, 45 (1), 111–117. Retrieved from: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.45.14582> [in Ukrainian]
 9. Rusanova, S., Onyshchenko, S. (2020). Development of transport and technological process options' concept for goods delivery with participation of maritime transport. *Technology audit and production reserves*. 1 (2 (51)). Retrieved from: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.198373>
 10. Pavlova, N. L. (2020). Network model of the goods in containers delivery organizing process. *Transport development*, 2 (7) (2020): 52–59. Retrieved from: <https://doi.org/10.33082/td.2020.2-7.05> [in Ukrainian]
 11. Pavlova, N., Onyshchenko, S. (2020). Organization of transport company's project-oriented management (on the example of the freight forwarding company). *Management of Development of Complex Systems*, 42, 23–28. Retrieved from: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.42.23-28>
 12. Onishchenko, S. P., Smrkovskaya, V. Yu. (2010). Modeling the process of formation of integrated cargo delivery systems [Modelirovaniye protsessa formirovaniya integrirovannykh sistem dostavki gruzov]. *Bulletin ONMU*, 3, 142–154. [in Russian]
 13. Onyshchenko, S. P., Koskina, Yu.A. (2019). Essence, Specifics and Forming of Cargo Delivery Systems. *Bulliten of Vinnytsia Politechnical Institute*, 144 (3), 86–95. Retrieved from: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-144-3-86-95> [in Ukrainian]
 14. Kichkina, O. I. (2015). Selection of the cargo delivery optimal scheme in logistics systems. *Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 2, 9–11. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VSunu_2015_2_3 [in Ukrainian]
 15. Aulin, V. V., Golub, D. V., Grinkiv, A. V., Lysenko S. V. (2017). Methodological substantiation of the reliability problem of transport systems functioning research and solution [Metodolohichne obruntuvannya doslidzhennya ta vyrishennya problemy nadiynosti funktsionuvannya transportnykh system]. *Technical service of agro-industrial, forest and transport complexes*, 10, 29–36. Retrieved from: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/9373> [in Ukrainian]
 16. Onyshchenko, S. P., Shutenko T. M. (2012). The specifics of market risks and measures to reduce them in the modern shipping business [Spetsifika rynochnykh riskov i meropriyatiy po ikh snizheniyu v sovremennom sudokhodnom biznese]. *Actual problems of Economics*, 2, 85–98. [in Russian]
 17. Onyshchenko, S. P., Korniets, T. Y. (2015). Evaluation of market risk of projects of vessel acquisition [Otsenka rynochnogo riska proyektov priobreteniya sudna]. *Innovative economy*, 4, 198–205. [in Russian]

ТРАНСПОРТУВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ В ГАЗОГІДРАТНОМУ СТАНІ

М.В. Босий¹, В.В. Клименко²

¹викладач кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва,
Центральноукраїнський національний технічний університет,
Кропивницький, Україна
ORCID ID: 0000-0002-3090-0427

²д. т. н., професор кафедри електротехнічних систем
та енергетичного менеджменту,
Центральноукраїнський національний технічний університет,
Кропивницький, Україна
ORCID ID: 0000-0001-6840-7307

Анотація

Вступ. Нині споживання природного газу в Україні та у світі постійно зростає. Традиційні технології його транспортування часто виявляються неефективними і не сприяють розробці невеликих родовищ. Транспортування природного газу на тепер здійснюється морем, використовуючи такі технології, як: LNG-технологія, CNG-технологія і особливо заслуговує на увагу NGH-технологія – газ у газогідратній формі. **Метою** роботи є обґрунтування перспективних технологій транспортування газу в газогідратній формі і розробка схемно-технологічного рішення застосування процесу гідратоутворення під час видобутку вуглеводневих газів, їх транспортування і використання для умов малодобітних родовищ та схемно-технологічного рішення регазифікації гідратних пелет у контейнері для їх транспортування. **Результати.** Обґрунтовано перспективи впровадження технології транспортування газу в газогідратній формі. Наведені переваги NGH-технології порівняно з іншими технологіями. Згідно з відомою на тепер NGH-технологією запропоновано формувати газогідрати у вигляді пелетів, покритих тонким шаром льоду. Вибір форми пелетів і послідовність їх виготовлення спрямовані на оптимізацію процесів NGH-технології. **Висновки.** Запропоновані схемно-технологічні рішення: перше – застосування процесу гідратоутворення для видобутку та підготовки до транспортування вуглеводневих газів з малодобітного родовища; друге – регазифікація гідратних пелет у контейнері для їх транспортування. Ця технологія дозволяє з мінімальними енерговитратами отримати газогідратні пелети, а їх транспортування у такій формі дозволить значно знизити вартість транспортного обладнання.

Ключові слова: природний газ, морський транспорт, тиск, температура, гідратоутворення, газогідратні пелети, регазифікація.

TRANSPORTATION OF NATURAL GAS IN THE GAS-HYDRATE STATE

M.V. Bosyi¹, V.V. Klymenko²

¹lecturer at the Department of Materials Science and Foundry,
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-3090-0427

²Ph.D. Professor at the Department of Electrical Systems and Energy Management,
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID ID: 0000-0001-6840-7307

Summary

Introduction. Currently, the demand for natural gas consumption in Ukraine and in the world is constantly growing. Traditional technologies for its transportation are often inefficient and do not contribute to the development of small deposits. The transportation of natural gas is currently carried out by sea using such technologies as LNG-technology, CNG-technology and especially noteworthy NGH-technology – gas in hydrated form. **The aim of the work** is to substantiate promising technologies for gas transportation in gas hydrate form and to develop a circuit-technological solution for the application of hydrate formation in hydrocarbon gas production, transportation and use for low-flow fields and circuit-technological solution for regasification of hydrate pellets in a container for their transportation. **Results.** Prospects for the introduction of gas transportation technology in gas hydrate form are substantiated. The advantages of NGH-technology in comparison with other technologies are given. According to the NGH-technology known today, it is proposed to form gas hydrates in the form of pellets covered with a thin layer of ice. The choice of pellet shape and the sequence of their manufacture are aimed at optimizing the processes of NGH-technology. **Conclusions.** Schematic technological solutions are offered: the first – application of hydration formation process for extraction and preparation for transportation of hydrocarbon gases from low-debit field; the second is regasification of hydrate pellets in a container for their transportation. This technology allows to obtain gas hydrate pellets with minimal energy consumption, and them transporting in this form will significantly reduce the cost of transport equipment.

Key words: natural gas, sea transport, pressure, temperature, hydration, gas hydrate pellets, regasification.

Вступ. Нині ефективне транспортування природного газу – важливий чинник енергетичної безпеки України. У процесі морського транспортування газу використовують технології скраплення газу та LNG-танкери (газовози). Проте не тільки LNG-технології розглядаються нині як альтернатива трубопровідному транспорту. Альтернативою для морського транспортування газу є його перевезення у стиснутому стані – CNG-технології [1].

LNG-технологія потребує енерговитратної і високовартісної інфраструктури зі скраплення і регазифікації [1]. Альтернативою для морського транспортування газу, особливо з ізольованих родовищ, є його перевезення у вигляді CNG-технології. Технологія CNG має нижчу вартість виробництва й зберігання порівняно з LNG-технологією, оскільки не потребує дорогого процесу охолодження та криогенних резервуарів [2].

У разі порівняння перевезення газу танкерами LNG-технологією і CNG-технологією відстань, з якої більш ефективно транспортувати газ у вигляді цих технологій, може змінюватися залежно від типу проєкту, розміру родовища, місткості ринку та інших економічних умов. Загалом витрати з перевезення CNG-технологією порівняно з LNG-технологією є нижчими у разі відстані менш ніж 2500 км.

Натепер на різних стадіях розробки і втілення є кілька альтернативних технологій транспортування природного газу NGH-технології – газ у газогідратній формі; GTL-технології – газ у рідкій формі; GTW-технології – газ у електроенергію.

Застосування NGH-технології порівняно як з традиційним трубопровідним транспортом, так і транспортом LNG-технології буде економічно вигідним починаючи з відстані 1000 км [3; 4]. До перспективних напрямів транспортування природного газу та подальших досліджень і впроваджень належать такі як: розробка сучасних енергоощадних технологій отримання метану з газогідратних покладів; розробка процесів та обладнання безтрубопровідного транспортування метану в гідратному стані морським транспортом [4].

Постановка проблеми. Нині посилюється інтерес до газових гідратів у всьому світі, у деяких країнах уже розпочалося їх дослідно-промислове освоєння. Морські газогідрати визнані фахівцями найперспективнішим альтернативним паливом у багатьох країнах, над їх розвідкою й освоєнням активно працюють у США, Японії, Кореї, Франції, Німеччині, Великобританії, Канаді та Індії. Японська держкорпорація нафти, газу і металів (JOGMEC) уперше у світі змогла видобути газ із гідрату метану на дні океану [4]. Значно далі просунулися дослідження в галузі перевезення природного газу у вигляді газових гідратів. У Кореї освоєнням газогідратних покладів займається державна компанія Korea National Oil Corp. Потужність газогідратів на корейському шельфі Японського моря оцінюються в 1 трлн м³ метану. За оцінками американської компанії Mineral Management Service, запаси газогідратного газу в Мексиканській затоці можуть досягати астрономічного значення – 600 трлн м³ метану.

Нині Україна вкрай зацікавлена в розвитку газогідратних технологій. Видобування метану з природних газових гідратів дасть змогу замінити значну частину імпорту природного газу, а в майбутньому – відмовитися від нього взагалі. Транспортування природного газу у вигляді гідратів також є актуальним як альтернатива його перевезенню у зрідженому (скрапленому) стані. У результаті досліджень, здійснених у 1990-х роках Інститутом геологічних наук НАН України, у Чорному морі було виявлено три зони гідратоутворення із запасами, загальні обсяги яких оцінюються в 50–60 трлн м³ метану [6; 7].

Натепер у світі і в Україні на різних стадіях розробки або впровадження існують технології та технологічні рішення, які пов'язані із газогідратним транспортом природного газу [3–10]. Капітальні витрати на втілення газогідратної технології порівняно з LNG-технологією є на 12 % нижчими [8].

Нині наявні проблеми накопичення, транспортування та зберігання природного газу. При цьому традиційні технології його транспортування трубопроводами чи у вигляді скрапленого або стисненого газу часто виявляються менш ефективними.

Це стосується, наприклад, проблеми забезпечення споживачів природним газом у разі відсутності трубопроводів та видобування газу з необлаштованих родовищ. Тому актуальними стають технології транспортування і зберігання газу в гідратному стані, а також розробки низькорентабельних родовищ і дорозробки вже виснажених родовищ за допомогою конверсії газу, що видобувається з гідратів. З цього випливає, що стають важливими питання створення установок з виробництва газових гідратів та транспортування природного газу в газогідратному стані.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині цікавою може бути технологія норвезьких дослідників з перетворення природного газу в газогідрат. Ідея технології в тому, що газ перетворюється на заморожений гідрат, змішується з охолодженою нафтою до консистенції рідкої глини і в такому стані перевозиться, наприклад, танкером на берег. Його перевага в тому, що отримана газонафтова суміш, охолоджена до температури мінус 10 або мінус 20 °С, зберігає стабільність за атмосферного тиску [9].

В Японії побудовані дві напівпромислові установки з отримання льодогідратних «пігулок», які можна зберігати і перевозити за низьких температур. У Великобританії створена дослідно-промислова установка для відпрацювання технології отримання газових гідратів на морських платформах з подальшим їх транспортуванням [10].

В галузі досліджень і створення установок з виробництва газогідратів лідером є Японія. Компанія Mitsui Engineering & Shipbuilding Co разом з JOGMEC створила першу технологічну (напівпромислову) установку. На першій стадії утворюється пульпа гідрату методом барботажа. На другій – газогідрати очищаються, після цього їм надається сферична форма (діаметром 5–70 мм). Подальше зберігання газогідратів здійснюється за атмосферного тиску і температури близько мінус 20 °С, тобто за термобаричних умов, коли виявляється ефект самоконсервації. Продуктивність установки – 600–800 кг/доб., але у разі необхідності може бути збільшена до 5–6 т [11].

Натепер Японією розпочато можливість морського транспортування природного газу в газогідратному стані, або NGH (natural gas hydrate). Для зберігання і транспортування газових гідратів потрібна температура, набагато ближча до природної. Тиск у разі мінусових значень температури гідрату можна знизити до атмосферного, тоді й устаткування для його отримання та спеціальні транспортні засоби для перевезення будуть дешевші, наприклад, за транспортування зрідженого метану [10; 11].

Аналіз інформаційних джерел стосовно розробок, пов'язаних із транспортом газу в газогідратній формі, показав, що найбільш досконалим і обґрунтованим є метод виробництва газових гідратів для транспортування і зберігання, який захищений патентом US No. 5536893 [12]. З'являються сучасні технології, що дозволяють забезпечити можливість розробки віддалених газових родовищ і утилізації попутного газу одиночних родовищ нафти, в т. ч. і на шельфі, для яких прокладка газопроводу нерентабельна. В основі цих технологій лежить спосіб створення замороженого гідрату газу, змішаного з льодом. При цьому отримана «газо-буферна» суміш охолоджується до температури, близької до нуля градусів, і зберігає стабільність у разі нормального атмосферного тиску. Очевидно, що така технологія дозволить насамперед вирішити завдання транспортування газу

без використання трубопроводу і безпечного зберігання газогідратної суміші за атмосферного тиску і температури [13].

Технологію транспортування газу у газогідратній формі доцільно порівнювати із технологією транспортування зрідженого газу (рис. 1). Порівняння ефективності вказаних технологій показало, що загальні витрати транспортування природного газу у газогідратному стані виявилися на 12–24 % нижчими [9]. До переваг газогідратних технологій також слід віднести простіші умови транспортування та зберігання.

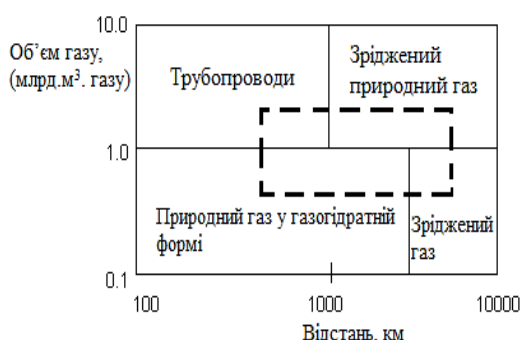


Рис. 1. Ефективність транспортування природного газу до споживачів за різними технологіями [9]

Зріджений природний газ необхідно транспортувати за температури $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ та високого тиску, що небезпечно для довкілля [8]. А природний газ у газогідратній формі може знаходитися під час зберігання чи переміщення за температури мінус $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7].

Отже, транспортування газогідрату до місця зберігання здійснюється у замороженому вигляді морським транспортом (із теплоізольованими бункерами для гранульованого газогідрату і льодогазогідратних блоків) [14].

Одним із основних процесів газогідратних технологій, що розробляються у світі, є утворення газогідратних капсул, гранул чи блоків, придатних до транспортування і довгострокового зберігання. Для запобігання втрат під час транспортування і зберігання утворених газогідратів на їх поверхні доцільно утворити льодяну кірку з метою їх примусової консервації [5–12; 14].

Отже, натепер актуальними стають технології транспортування і зберігання газу в гідратному стані, а також розробки низькорентабельних родовищ і дорозробки вже виснажених родовищ за допомогою конверсії газу, що видобувається з гідратів. З цього випливає, що стають важливими питання створення установок з виробництва газових гідратів та транспортування газогідратів у вигляді гранульованого газогідрату, про що свідчать останні досягнення японських фахівців.

Формулювання цілей статті. Метою цієї роботи є обґрунтування перспективних технологій транспортування газу в газогідратній формі і розробка схемно-технологічного рішення застосування процесу гідратоутворення під час видобутку вуглеводневих газів, їх транспортування і використання для умов малодебітних родовищ та схемно-технологічного рішення регазифікації гідратних пелет у контейнері для їх транспортування.

Виклад основного матеріалу. Газогідрати – це кристалічні сполуки води та газу, які є стійкими за низьких температур та підвищеного тиску. Найпоширенішими газогідратами є гідрати метану – сполуки води та метану, поклади яких у донних осадових породах морів та океанів є досить значними в різних частинах світу, які в перспективі можуть стати альтернативним джерелом природного газу (рис. 2) [15–17].

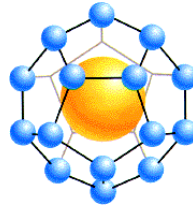


Рис. 2. Загальний вигляд структури газогідрату метану [15–17]

Термобаричні умови процесів утворення, зберігання і плавлення газогідратів є досить «м'якими», що дозволяє їх ефективно використовувати в різних технологічних напрямках, зокрема для виробництва та акумулювання холоду, стиснення газів, розділення газових сумішей, опріснення солоних вод, видобування метану із покладів газогідратів та транспортування природного газу у газогідратній формі (рис. 3) [3–12; 15–17].



Рис. 3. Газогідратні капсули в контейнері [7]

Нині обґрунтовано перспективи впровадження технології транспортування газу в газогідратній формі. Технологія переведення природного газу в гідратний стан розроблена краще, ніж технологія добування метану з природних гідратів. Проведено дослідно-промислові випробування гідратної технології отримання капсул (пелет), що складаються з гідратів метану та води, організовано виробництво гідратних капсул продуктивністю 0,7 т/день (за метаном), здійснено оцінку вартості гідратного способу транспортування природного газу [5]. Згідно з розробленою технологією, природний газ очищують від вуглекислого газу та сірководню і у взаємодії з водою отримують у вигляді гранул гідратів. Гранули гідратів зберігають у бункері і транспортують морем у контейнерах за температури мінус 20 °С. Потім поступово перевантажують у цистерни високого тиску, в яких перевозять до входу газової магістралі. Перед закачуванням до магістралі здійснюють регазифікацію гідратів шляхом дисоціації (розкладання) під впливом зовнішнього нагрівання.

Розглядаються перспективи розвитку гідратних технологій і транспортування газу як гідратів; тривалого зберігання природного газу у гідратному стані; видобутку газу з його гідратних родовищ [6; 7]. З метою вивчення процесів утворення та дисоціації гідратів вуглецевих сполук, що входять до складу природного газу, в Інституті газу НАН України створено гідратний стенд СГ-16: 100. Також на базі гігрометра ТОРОЗ-3-2ВИЗ (власної розробки Інституту газу НАН України) створено експрес-метод визначення термодинамічних та кінетичних параметрів гідратів. Для прискорення процесів гідратування робочу камеру гігрометра було обладнано барботером. Шляхом усереднення даних температури води й газу за заданого тиску в камері барботера фіксують термодинамічні умови утворення гідратів для такої технологічної схеми барботування [6; 7].

У роботах [8; 14] запропоновано та експериментально обґрунтовано основні елементи технології виробництва газогідратних блоків великих розмірів з метою їх транспортування і довгострокового зберігання.

У статті [18] розглянуто спосіб підвищення ефективності видобування газу з виснажених родовищ шляхом застосування газогідратної технології та представлено схемне рішення установки для його реалізації. Проаналізовано технології видобування метану з газогідратних покладів в акваторії Чорного моря та розглянуто напрями досліджень окремих складників газогідратних технологій [19]. Підвищення ефективності газогідратної технології транспортування природного газу наведено в роботі [20].

Нами пропонується схемно-технологічне рішення застосування процесу гідратування для видобутку та підготовки до транспортування вуглеводневих газів з малодобітного родовища – це дасть змогу розвивати сучасні технології транспортування газу в газогідратній формі. За цим схемним рішенням видобуток та підготовка до транспортування вуглеводневих газів з малодобітного родовища здійснюється таким чином (рис. 4).

Роботу запропонованого нами схемно-технологічного рішення розглянемо на наступному прикладі. Природний газ – суміш природного газу з іншими вуглеводнями зі свердловини 1 з тиском $p = 0,1$ МПа і температурою $T = 293$ К подається у сепаратор 2, де відокремлюється від крапель нафти, води і конденсату 3. Очищений газ стискається в компресорі 4 і охолоджується в теплообміннику 5. Стиснутий і охолоджений газ через ежектор 6 та барботаажний пристрій 11 поступає в кристалізатор 7, куди також подається вода. В кристалізаторі, де підтримуються $p = 2$ МПа і $T = 293$ К, утворюються газогідрати, а теплота гідратування відводиться пропаном, що кипить у випарнику 8. Тиск води не є критичною величиною для утворення газогідрату і він може бути встановлений на відповідному рівні, більш високому, ніж тиск у кристалізаторі 7. Але тиск води повинен бути відрегульований так, щоб забезпечити достатнє за обсягом введення води в кристалізатор 7. Швидкість утворення газогідрату можна збільшити за допомогою рециркулюючого непрореагованого газу, який можна також подавати в кристалізатор до основного потоку живлення свіжим газом через ежектор 6, досягаючи в такий спосіб ще кращого перемішування газу і води (суспензії).

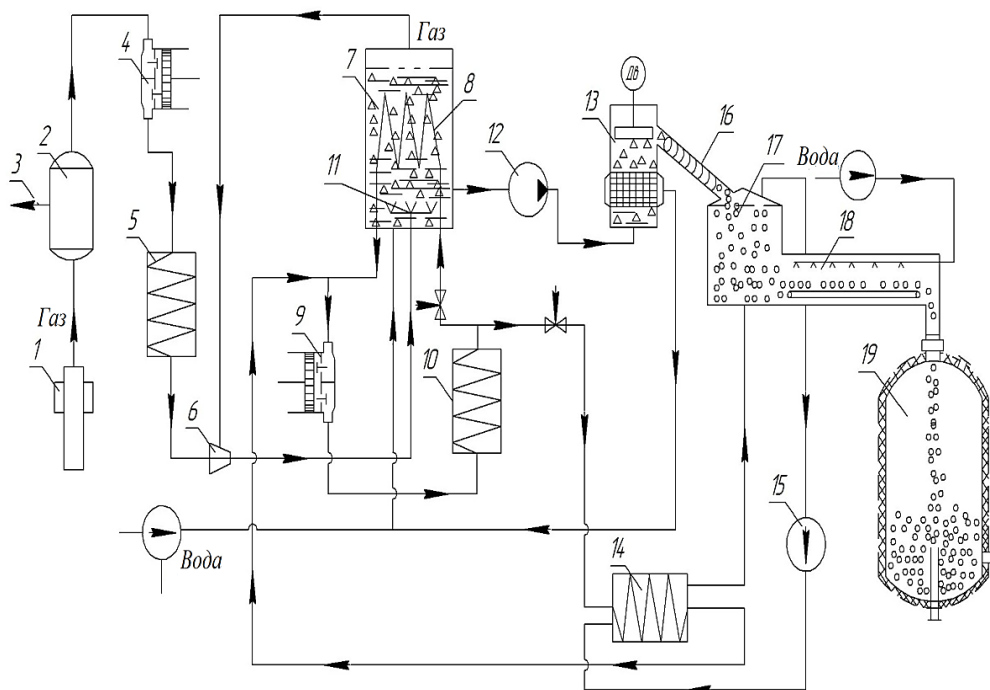


Рис. 4. Схемно-технологічне рішення застосування процесу гідратування для видобутку та підготовки до транспортування вуглеводневих газів з малодобітного родовища:

- 1 – газ зі свердловини; 2 – сепаратор; 3 – конденсат; 4 – компресор;
5, 14 – теплообмінник; 6 – ежектор; 7 – кристалізатор; 8 – випарник;
9 – компресор холодильної машини; 10 – конденсатор; 11 – барботажний пристрій;
12 – насос; 13 – сепаратор газогідратів; 15 – вентилятор для циркуляції газу;
16 – гвинтовий шнек (екструдер); 17 – ємність для утворення газогідратних пелет;
18 – пристрій консервації газогідратних пелет; 19 – контейнер для зберігання пелет

Джерело: власна розробка авторів

Водогазогідратна суспензія подається насосом 12 у сепаратор газогідратів 13, де частинки гідрату відокремлюються від води, яку змішують з потоком свіжої води і направляють знову в кристалізатор 7. Після сепарації водогідратної суспензії гідрати поступають у пристрій для гранулювання частинок гідрату 16 (екструдер). Воду, яка виділяється у процесі екструдерування, направляють знову в кристалізатор (на рис. 4 не показано), а з газогідратів формують газогідратні пелети, наприклад, у формі кульок діаметром 20 мм. Пелети в грануляторі 17 охолоджуються до температури ≈ -20 °С та частково підморожуються газом, який подається з випарника 14, утворюючи гранули.

Потім такі гранули поступають по транспортеру в пристрій для консервації гідратів 18, де зверху на них розпилюється охолоджена вода і гідрати покриваються тонким шаром льоду, зберігаючи при цьому загальний вміст газу усередині частинок. Діаметр стиснутих частинок гідрату залежить від способу гранулювання і необхідного ступеня стиснення, але типовий діаметр гранульованих

частинок гідрату природного газу перебуває в межах 10–20 мм. Щільність гранульованих частинок гідрату газу становить 850–950 кг/м³. Товщину крижаної оболонки можна змінювати за необхідності, досить, щоб крижана оболонка мала товщину 0,5–1,5 мм. Крижана оболонка льоду має вплив на стабільність частинок гідрату. По-перше, запобігається дифузія газу зсередини в зовнішнє середовище, тому що дифузія газу крізь лід дуже мала і нею можна знехтувати. По-друге, крижана оболонка – це захисне покриття, що втримує підвищений внутрішній тиск у частинці гідрату, достатній для запобігання розкладання типового гідрату природного газу у разі температур, на декілька градусів нижчих 0 °С, і атмосферного тиску.

Отримані таким чином гранульовані, охолоджені і покриті крижаною оболонкою (тонким шаром льоду) частинки гідрату у вигляді пелет надходять у резервуар-контейнер 19 для зберігання. Цей контейнер придатний до транспортування та надалі і для проведення процесу регазифікації.

Як зазначено вище, утворені відповідним чином газогідратні пелети, покриті крижаною плівкою невеликої товщини, можна довгостроково зберігати та транспортувати за атмосферного тиску і температур –10...–20 °С, але навіть за температури –1,5 °С протягом певного часу вони зберігають свою стійкість.

Нескладні розрахунки показують, що у разі витрат природного газу ~52 м³ за годину (1250 м³ за добу) необхідно ~3 год, щоб утворити 1 м³ газогідратів.

Газогідратні пелети, підготовлені до транспортування, можна завантажувати в пластмасові термоізовані ємності-контейнери, наприклад, розміром $d \times h = 0,7 \times 1,2$ м. В одну ємність поміститься ~0,4–0,5 т газогідратів, а таких ємностей з урахуванням часу на регазифікацію досить буде 12 шт.

У разі необхідності накопичення резервної маси газогідратів, наприклад, внаслідок нерівномірного споживання природного газу, доцільно на місці споживання розмістити додаткову стаціонарну ємність (або кілька ємностей) для зберігання газогідратних пелет за атмосферного тиску і невеликих від'ємних температур, в яку можна було б розвантажувати газогідрати з транспортних ємностей.

Регазифікацію газогідратів можна здійснювати безпосередньо в транспортних контейнерах шляхом подачі в них теплої води з температурою 30–40 °С, для нагрівання якої використовується тепловий насос (рис. 5).

Процес регазифікації в транспортній ємності здійснюється таким чином. У патрубок 4 подається тепла вода з теплового насосу 8. У разі контакту теплої води з пелетами вони спочатку підігріваються до температури плавлення, а потім плавляться за тиску $p = 0,15$ МПа. Газ, який виділяється через патрубок 2, направляється до споживача, а холодна вода через патрубок 5 повертається до теплового насосу 8 для підігріву. Тиск газу після регазифікації повинен дорівнювати 0,15 МПа. Тому швидкість плавлення газогідратів і, відповідно, кількість виділеного газу потрібно регулювати, узгоджуючи їх з графіком споживання. В теплий період року регазифікатор доцільно використовувати як охолоджувач для системи кондиціонування повітря.

Розробка способів ефективного транспортування газу є одним з актуальних завдань не тільки газової і нафтогазової галузі, але й енергетичного комплексу загалом. Тому останнім часом з'являються технології, що дозволяють забезпечити

можливість розробки віддалених газових родовищ і утилізації попутного газу одиночних родовищ газу і нафти, в т. ч. і на шельфі, для яких прокладка газопроводу нерентабельна.

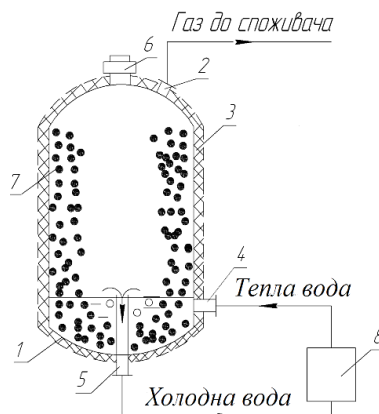


Рис. 5. Схемно-технологічне рішення регазифікації гідратних пелет у контейнері для їх транспортування

- 1 – корпус транспортної ємності; 2 – патрубков подачі газу до споживача;
3 – термоізоляція; 4, 5 – патрубков для підводу теплої води і відводу холодної;
6 – люк для завантаження газогідратних пелет;
7 – газогідратні пелети; 8 – тепловий насос

Джерело: власна розробка авторів

До переваг газогідратних технологій також слід віднести простіші умови транспортування та зберігання. Природний газ у газогідратній формі може знаходитися під час зберігання чи переміщення за температур мінус 20 °С. Слід відзначити, що для транспортування газу у вигляді газових гідратів потрібні спеціальні герметичні ємності. Під час транспортування гідратів потрібно контролювати тиск і температуру всередині ємності, щоб не дозволити розтанути крижаній кірці на поверхні гідратів. Як уже було зазначено, транспортування гідратів можна здійснювати навіть за атмосферному тиску та температури нижче 0 °С.

Для України транспортним засобом для перевезення газогідратів будуть, на нашу думку, в основному автомобільний, річковий, морський і частково залізничний транспорт. Тому транспортування газогідрату до місця зберігання буде здійснюватися в замороженому вигляді гранульованого газогідрату (газогідратних пелет), покритого тонким шаром льоду в теплоізолюваних транспортних контейнерах автомобільним і морським транспортом.

Висновки. Проаналізовано стан наукових і практичних досліджень у галузі газогідратних технологій. Розглянуто питання застосування газогідратної технології для транспортування природного газу в газогідратній формі. З'ясовано, що технологія морського транспортування природного газу в газогідратній формі має низку суттєвих переваг над LNG- і CNG-технологіями. Загальні витрати транспортування природного газу у газогідратному стані виявилися на 12–24 % нижчими, ніж традиційні технології. NGH-технологія максимально підходить для вирішення проблеми диверсифікації поставок природного газу в Україну та для розробки

морських родовищ газу і нафти. Запропоновано та описано схемне рішення технологічного застосування процесу гідратуутворення під час видобутку вуглеводневих газів, їх транспортування і використання для умов малодебітних родовищ та схемно-технологічного рішення регазифікації гідратних пелет у контейнері для їх транспортування. Показано, що транспортування природного і попутного газу у газогідратній формі є особливо перспективним у разі розробки відносно малих і віддалених від інфраструктури родовищ, де недоцільно будувати трубопровід чи інфраструктуру LNG-технології.

ЛІТЕРАТУРА

1. Economides M., Sun K., Subero G. Compressed Natural Gas (CNG): An Alternative to Liquefied Natural Gas (LNG). *Journal SPE Production & Operations*. Volume 21, Number 2. SPE 92047. *Society of Petroleum Engineers*. 2006. P. 318–324.
2. Seungyong Chang. Comparing Exploitation and Transportation Technologies for Monetisation of Offshore Stranded Gas. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Indonesia, Jakarta. 2001. 17–19 April.
3. Gudmundsson J. Storing natural gas as frozen hydrate / J. Gudmundsson, M. Parlaktuna, A. Khokhar. *SPE Production and Facilities*. 1994. February. P. 69–73.
4. Kanda H. Economic study on natural gas transportation with natural gas hydrate (NGH) pellets. *23rd World Gas Conference*, Amsterdam. 2006. 11 p.
5. Тарко Я. Б., Педченко Л. О., Педченко М. М. Перспективи газогідратної технології на ринку морських перевезень природного газу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2012. Випуск 2 (43). С. 49–55.
6. Жук Г. В., Пятничко А. И., Крушневич В. Т., Федоренко Д. С. Метаногидраты: анализ ситуации, исследования свойств, проблемы добычи и транспортирования. *Технические газы*. 2014. № 2. С. 3–10.
7. Жук Г. В., Пятничко А. И., Крушневич В. Т., Федоренко Д. С., Клименко В. В. Метаногидратные технологии в Украине: исследования и перспективы. *Геология. Гірництво. Нафтогазова справа. Енергетика*. 2014. № 1 (3). С. 3–10.
8. Педченко Л. О., Педченко М. М. Транспортування природного газу у газогідратній формі. *Геология. Гірництво. Нафтогазова справа. Енергетика*. 2014. № 1 (3). С. 100–113.
9. Trondheim Gudmundsson J. S. Gas-in-ice: Concept evaluation / J. S. Gudmundsson, M. Parlaktuna. Technical report, Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics. Norwegian University of Science and Technology 1991.
10. Якушев В. С., Герасимов Ю. А., Квон В. Г., Истомин В. А. Современное состояние газогидратных технологий. Обзор информации. Москва : ООО «ИРЦ Газпром». 2008. 88 с.

11. Nakai S. Development of natural gas hydrate (NGH) supply chain. *Proceedings of the 25th worldgas conferences*. Kuala Lumpur, Malaysia, June 4–8. 2012. P. 367–375.
12. Gudmundsson J. S., US Patent No. 5536893. Method for production of gas hydrates for transportation and storage. J. S. Gudmundsson; inventor J. S. Gudmundsson. No. 195748; 07.01.1994; pub. 16.07. 1996. 7 p.
13. Хавкин А. Я. Перспективы создания газогидратной промышленности. *Вестник РАОН*. 2010. Т. 10. № 1. С. 42–45.
14. Білецький В. С., Педченко Л. О., Педченко М. М. Технологія формування газогідратних блоків з метою транспортування та зберігання вуглеводневих газів. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2012. Випуск № 1–2 (30–31). С. 363–372.
15. Бык С. Ш., Макогон Ю. Ф., Фомина В. И. Газовые гидраты. Москва : Химия. 1980. 296 с.
16. Макогон Ю. Ф. Гидраты природных газов. Москва : Недра. 1974. 208 с.
17. Макогон Ю. Ф. Газогидраты, история изучения и перспективы освоения. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2010. № 2. С. 5–21.
18. Клименко В. В., Зоценко М. Л., Бандуріна О. В., Педченко Л. О. Підвищення ефективності видобування і підготовки газу з виснажених родовищ шляхом застосування газогідратної технології. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2012. Випуск 2 (73). С. 92–95.
19. Онищенко В. О., Клименко В. В. Застосування газогідратних технологій в нафтогазовій промисловості. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2011. № 4 (41). С. 5–8.
20. Pedchenko L. A., Pedchenko M. M. Improving the efficiency of gas hydrate technology of transportation of natural gas. “*Problems of energy saving and nature use 2013*” : conference reports materials. Budapest. 2014. P. 70–78.

REFERENCES

1. Economides, M., Sun, K., Subero, G. (2006). Compressed Natural Gas (CNG): An Alternative to Liquefied Natural Gas (LNG). *Journal SPE Production & Operations*. Volume 21, Number 2. SPE 92047. Society of Petroleum Engineers, 318–324. [in English]
2. Seungyong, Chang (2001). Comparing Exploitation and Transportation Technologies for Monetisation of Offshore Stranded Gas. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Indonesia, Jakarta, 17–19 April. [in Indonesian]
3. Gudmundsson, J. S. (1994). Storing natural gas as frozen hydrate / J. Gudmundsson, M. Parlaktuna, A. Khokhar. *SPE Production and Facilities*. February, 69–73. [in English]
4. Kanda, H. (2006). Economic study on natural gas transportation with natural gas hydrate (NGH) pellets. 23rd World Gas Conference, Amsterdam, 11. [in Netherlands]

5. Tarko, Ya. B., Pedchenko, L. O. & Pedchenko, M. M. (2012). Prospects of gas hydrate technology in the market of maritime transportation of natural gas [Perspektyvy hazohidratnoi tekhnolohii na rynku morskykh perevezhen pryrodnoho hazu]. *Exploration and development of oil and gas fields*, 2 (43), 49–55. [in Ukrainian]
6. Zhuk, G. V., Pyatnichko, A. I., Krushnevich, V. T., & Fedorenko, D. S. (2014). Methanohydrates: situation analysis, property studies, mining and transportation problems [Metanogidraty: analiz situatsii, issledovaniya svoystv, problemy dobychi i transportirovaniya]. *Technical gases*, No. 2, 3–10. [in Ukrainian]
7. Zhuk, G. V., Pyatnichko, A. I., Krushnevich, V. T., Fedorenko, D. S., & Klymenko, V. V. (2014). Methanohydrate technologies in Ukraine: research and prospects [Metanogidratnyye tekhnologii v Ukraine: issledovaniya i perspektivy]. *Geology. Mining. Oil and gas business. Energy*, No. 1 (3), 3–10. [in Ukrainian]
8. Pedchenko, L. O., & Pedchenko, M. M. (2014). Transportation of natural gas in gas hydrate form [Transportuvannia pryrodnoho hazu u hazohidratnii formi]. *Geology. Mining. Oil and gas business. Energy*, No. 1 (3), 100–113. [in Ukrainian]
9. Trondheim, Gudmundsson J. S. (1991). Gas-in-ice: Concept evaluation / J. S. Gudmundsson, M. Parlaktuna. Technical report, Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics, Norwegian University of Science and Technology. [in English]
10. Yakushev, V. S., Gerasimov, Y. A., Kwon, V. G., & Istomin, V. A. (2008). Modern state of gas hydrate technologies [Sovremennoye sostoyaniye gazogidratnykh tekhnologiy]. *Rev. inf. Moskva : LTD "IRTS Gazprom"*, 88. [in Russian]
11. Nakai, S. (2012). Development of natural gas hydrate (NGH) supply chain. Proceedings of the 25th worldgas conferences. Kuala Lumpur, Malaysia, June 4–8. P. 367–375.
12. Gudmundsson, J. S., US Patent No. 5536893. Method for production of gas hydrates for transportation and storage. J. S. Gudmundsson; inventor J. S. Gudmundsson. No. 195748; 07.01.1994; pub. 16.07.1996, 7.
13. Khavkin, A. Ya. (2010). Prospects for the creation of the gas hydrate industry [Perspektyvy sozdaniya hazohidratnoy promyshlennosti]. *Vestnik RAEN*, V. 10, No. 1, 42–45. [in Russian]
14. Biletskyi, V. S., Pedchenko, L. O., & Pedchenko, M. M. (2012). Technology of formation of gas-hydrate blocks for the purpose of transportation and storage of hydrocarbon gases [Tekhnolohiia formuvannia hazohidratnykh blokiv z metoiu transportuvannia ta zberihannia vuhlevodnykh haziv]. *News of Donetsk Mining Institute*, No. 1 (30), 2 (31), 363–372. [in Ukrainian]
15. Byk, S. Sh., Makoron, Yu. F., & Fomina V. I. (1980). Gas hydrates [Hazovye hydraty]. Moskva : Khimiya, 296. [in Russian]

16. Makogon, Yu. F. (1974). Hydrates of natural gases [Hydraty pryrodnykh hazov]. Moskva : Subsoil, 208. [in Russian]
17. Makogon, Yu. F. (2010). Gas hydrates, history of study and prospects of development [Hazohydraty, ystoryya yzuchenyya y perspektyvy osvoenyia]. *Geology and minerals of the World Ocean*, No. 2, 5–21. [in Russian]
18. Klymenko, V. V., Zotsenko, M. L., Bandurina, O. V., & Pedchenko, L. O. (2012). Improving the efficiency of extraction and preparation of gas from depleted fields through the use of gas hydrate technology [Pidvyshchennia efektyvnosti vydobuvannia i pidhotovky hazu z vysnazhenykh rodovyshch shliakhom zastosuvannia hazohidratnoi tekhnolohii]. *Bulletin of the Mykhailo Ostrogradsky KrNU*, 2 (73), 92–95. [in Ukrainian]
19. Onyshchenko, V. O., & Klymenko, V. V. (2011). Application of gas hydrate technologies in the oil and gas industry [Zastosuvannia hazohidratnykh tekhnolohii v naftohazovii promyslovosti]. *Exploration and development of oil and gas fields*, No. 4 (41), 5–8. [in Ukrainian]
20. Pedchenko, L. A., & Pedchenko, M. M. (2014). Improving the efficiency of gas hydrate technology of transportation of natural gas. “Problems of energy saving and nature use 2013”: conference reports materials. 70–78. [in Hungarian]

**DETERMINATION OF FUNCTIONAL CHARACTERISTICS
OF CUSTOMS AND LOGISTICS INFRASTRUCTURE IN TRANSPORT
SYSTEMS OF INTERNATIONAL DIRECTION**

O.K. Gryshchuk¹, A.V. Petryk², Y.V. Yerko³

¹PhD, Professor of the Department of Tourism,
National Transport University, Kyiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-2993-5566

²PhD, Associate Professor at the Department of International Transport
and Customs Control,
National Transport University, Kyiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-7996-5814

³Postgraduate Student at the Department of International Transport
and Customs Control,
National Transport University, Kyiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-6759-9578

Summary

Introduction. Critical analysis of literature sources shows the trends of stable development of integration processes in international production structures. Increasing the production of industrial goods and food requires the creation of new and intensive use of existing infrastructure of production units. Therefore, the development of competitive customs and logistics systems for servicing foreign trade flows is one of the main tasks of the relevant government and commercial structures. **Purpose.** The peculiarity of the growing volumes of export and transit transportation of goods is the need to involve in the organization of foreign trade supplies of powerful transport hubs with appropriate infrastructure. Taking into account the specifics of the development of economic integration processes, sea trade ports correspond to such opportunities. And intensive use of the existing and creation of the newest infrastructure of subjects of economic activity demands development of technological and structural bases for improvement of transportations of foreign trade cargoes. The article investigates the methodology of forming the infrastructure of customs and logistics systems of export orientation, taking into account the assessment of the competitiveness of transport services. **Results.** Development and practical use of methods of formation of production infrastructure in transport hubs are based on the principles of economic integration and improvement of transportation processes. It was found that compliance with the terms of accumulation and processing of import and export cargo is an important characteristic for transport hubs. And with the complication of the tasks of transport and customs and logistics services there is a need to form a rational infrastructure of transport systems. The proposed methodology for the formation of the infrastructure of transport hubs provides an opportunity to identify ways to intensive use of existing and the creation of promising production facilities of customs and logistics systems provided the optimal distribution of material resources. **Conclusions.** In the course of the research new results were obtained to improve the methodology of formation of

customs and logistics infrastructure in transport hubs. Based on the main provisions of the theory of systems analysis, new and supplemented the existing results of the interaction of individual structural elements of production formations of international orientation. Using the method of simulation modeling, integrated indicators of quality transport service are calculated on the example of export cargo flows. The study can be useful for improving the efficiency of transport services for freight flows in international production structures.

Key words: *international transportation, customs and logistics infrastructure, transport systems, foreign trade cargo, transport hubs, economic integration.*

ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИТНО-ЛОГІСТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ В ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ МІЖНАРОДНОГО СПРЯМУВАННЯ

О.К. Грищук¹, А.В. Петрик², Я.В. Єрко³

¹к. т. н., професор кафедри туризму,
Національний транспортний університет, Київ, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-2993-5566

²к. т. н., доцент кафедри міжнародних перевезень та митного контролю,
Національний транспортний університет, Київ, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-7996-5814

³аспірант кафедри міжнародних перевезень та митного контролю,
Національний транспортний університет, Київ, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-6759-9578

Анотація

Вступ. Критичний аналіз літературних джерел свідчить про тенденції стабільного розвитку інтеграційних процесів у міжнародних виробничих структурах. Збільшення обсягів виробництва промислових товарів і харчової продукції вимагає створення нової та інтенсивного використання наявної інфраструктури виробничих формувань. Тому розробка конкурентоздатної митно-логістичної системи для обслуговування зовнішньоторговельних вантажопотоків є одним з головних завдань відповідних державних та комерційних структур. **Мета.** Особливість виконання зростаючих обсягів експортних та транзитних перевезень вантажів полягає у необхідності залучення до організації зовнішньоторговельних поставок потужних транспортних вузлів із відповідним інфраструктурним забезпеченням. З урахуванням специфіки розвитку економічних інтеграційних процесів таким можливостям відповідають морські торговельні порти. А інтенсивне використання наявної та створення новітньої інфраструктури суб'єктів господарської діяльності вимагає розробки технологічних і структурних засад для удосконалення перевезень зовнішньоторговельних вантажів. У статті досліджується методологія формування інфраструктури митно-логістичних систем експортного спрямування з урахуванням оцінки конкурентоздатності транспортних послуг. **Результати.** Розробка та практичне використання методів формування виробничої інфраструктури в транспортних вузлах ґрунтуються на засадах економічної інтеграції та удосконалення перевізних процесів. З'ясовано, що для транспортних вузлів важливою характеристикою є дотримання термінів

накопичення та переробки імпортно-експортних вантажів. А із ускладненням завдань транспортного та митно-логістичного обслуговування виникає необхідність формування раціональної інфраструктури транспортних систем. Запропонована методологія формування інфраструктури транспортних вузлів дає можливість визначити шляхи інтенсивного використання наявних та створення перспективних виробничих потужностей митно-логістичних систем за умови оптимального розподілу матеріальних ресурсів. **Висновки.** В процесі проведення дослідження отримано нові результати для удосконалення методології формування митно-логістичної інфраструктури в транспортних вузлах. На підставі основних положень теорії системного аналізу отримано нові та доповнено наявні результати взаємодії окремих структурних елементів виробничих формувань міжнародного спрямування. Із використанням методу імітаційного моделювання розраховані інтегральні показники якісного транспортного обслуговування на прикладі експортних вантажопотоків. Проведене дослідження може бути корисним для підвищення ефективності транспортного обслуговування вантажопотоків у міжнародних виробничих структурах.

Ключові слова: міжнародні перевезення, митно-логістична інфраструктура, транспортні системи, зовнішньоторговельні вантажі, транспортні вузли, економічна інтеграція.

Introduction. The formation of a rational structure of transport systems for the efficient servicing of foreign trade flows allows improving the competitiveness of existing production units by reducing the total logistics costs. In addition, with the use of technological and structural principles to improve transportation, it is possible to respond quickly to changes in seasonal supply volumes and the structure of logistics services. Compliance with these provisions, given the development of integration processes, becomes especially important for the production activities of powerful transport hubs and import-export enterprises, which store, process and tranship large volumes of foreign trade cargo. Diversification of transport system logistics services for a wide range of goods and the significant impact of market relations do not reduce the urgency of this problem, as the existing infrastructure is used by a significant number of business entities.

Formulation of the problem. Existing trends in the development of trade relations are based on the principles of economic integration between different countries and the relocation of production processes in international production structures. Due to the economic growth of countries, according to economic experts, the trends in the development of integration processes recorded in the recent period will continue for a long time. In recent years, the agro-industrial complex of Ukraine is increasing the volume of production and sales of agricultural products in domestic and foreign markets. Therefore, the organization of transportation of domestic agricultural products with the lowest costs for producers is one of the main tasks of the transport and road complex of Ukraine.

Analysis of recent research and publications. The methodology for determining the functional characteristics in the structures of transport and logistics formations is based on the use of the basic theoretical provisions of systems analysis [1; 2]. In

accordance with these prerequisites, the formation of the infrastructure of transport systems for servicing foreign trade flows is considered as an ordered set of sequential technological operations [2; 3]. In this case, the end result of one technological phase is the initial condition for another, and operational management of the whole complex of coordination of production processes in production structures is carried out on the principles of system integration [4; 5]. A number of scientific papers on the example of servicing import-export and transit cargo flows involving different modes of transport showed the feasibility and positive features of this approach [6; 7]. Some components of the transport and technological process in the customs and logistics structures are determined by the relevant indicators' characteristics of these production units [7; 8]. However, the very definition of integrated indicators of service of cargo flows allows us to conclude about the efficiency of the transport system as a whole [9; 10]. The development of trade relations on the basis of economic integration between states and individual economic entities has posed qualitatively new challenges to the country's transport system. In most cases, the beginning and end of the movement of foreign trade goods are carried out by various transport and logistics companies. And since the transport and technological process itself consists of a number of production operations of preparation, storage and warehousing of cargo, in the modern period it has become the basis of the approach to the creation of new customs and logistics systems [11]. Widespread use of logistics management methods is based on the use of technological and organizational principles to improve transportation by combining production, transport, warehousing and trade processes into a single production structure. And a fundamentally new approach to the development of integration processes involves the definition of organic relationships for the maintenance of material flows, including the integration of related financial and information processes into a single customs and logistics system [10; 12].

Formulation of the goals of the article. Existing tendencies to increase export and transit of agro-industrial products through the country outlined scientific prospects for developing technological and structural principles for improving grain transportation under intensive use of existing infrastructure of Ukraine's transport system, railway junctions and port facilities. Given the peculiarities of the implementation and growth of exports of grain, special attention should be paid to the organization of foreign trade supplies of these goods through sea trade ports.

Presentation of the main material. Under the condition of intensive use of the existing infrastructure of customs and logistics systems, uniform distribution of cargo flows and coordinated separate transport enterprises, sea trade ports of Ukraine are able to handle significant volumes of foreign trade cargo. Generalization of the technology of material flow movement on the example of grain resources allows determining the features of customs and logistics services of these cargo flows (Fig. 1).

The technology of transport service of grain traders is closely connected with the production activity of these economic structures. The functions of these organizations include the purchase and temporary storage of grain, the creation of a joint party and its delivery to the country of destination on chartered vessels. The above scheme of the export process requires quality transport services at all stages of its implementation.

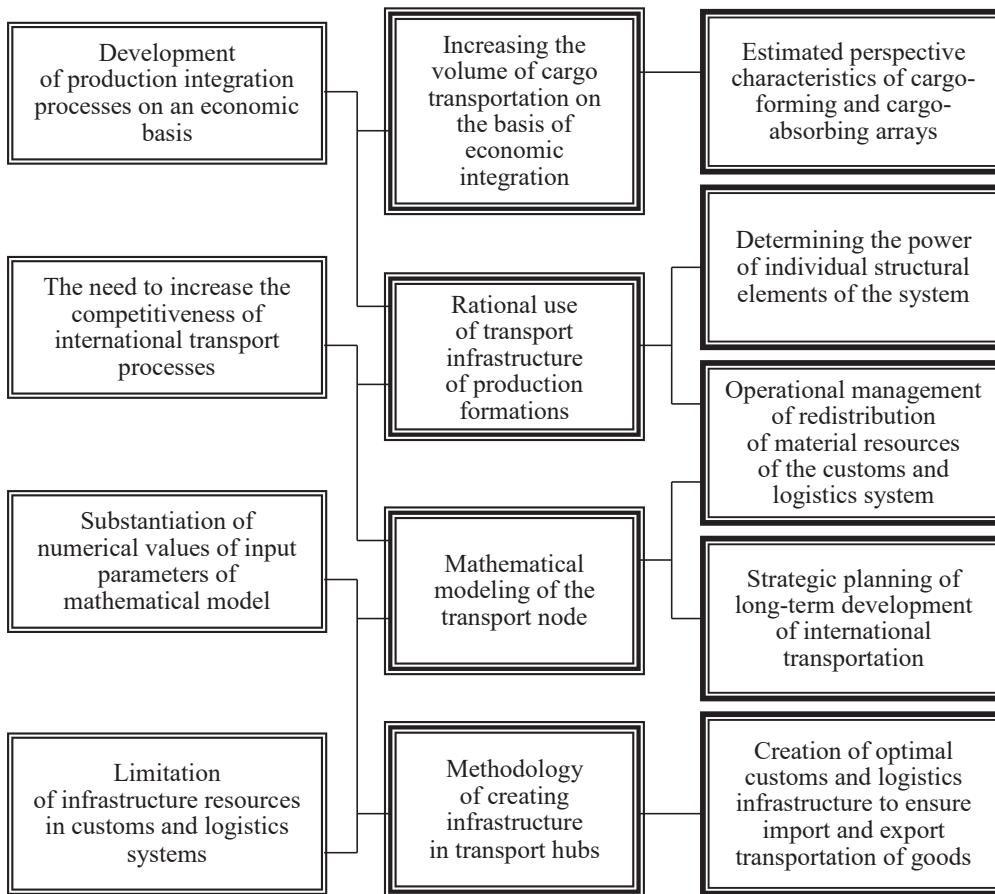


Fig. 1. Determining the functional characteristics of customs and logistics infrastructure in transport hubs

Determining the functional characteristics of the customs and logistics infrastructure requires a step-by-step analysis of the efficiency of the transportation process. The methodology of these studies at the first stage involves determining the optimization criteria. Such criteria for servicing these foreign trade flows can be summarized in logistics costs. Therefore, using the methodological principles of system analysis, each of the possible options for the movement of grain cargo is characterized by the specified integrated indicator F , provided the appropriate infrastructure.

Determining the technical and technological characteristics of the customs and logistics infrastructure under the condition of forming a joint batch of export and transit transportation of grain is considered on the basis of modern mathematical methods of optimization. To this end, the process of creating a combined party has been modelled as a valid set of a limited number of freight transport schemes. That is, the initial conditions assume that in the process of creating a joint export party in the transport hub can be implemented n production and technological processes P_1, \dots, P_n its accumulation. In this case, the appropriate infrastructure R_1, \dots, R_m is used, i. e. the existing transport system has b_i units of infrastructure elements R_i

cases the lack of appropriate infrastructure, it is not possible to use the best option for transport and technological scheme. Therefore, in mathematical models, the constraints of infrastructural resources b_i corresponding to the variable x_j are characterized by the values of the vector

$$B = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_m \end{pmatrix}. \quad (5)$$

And in accordance with the chosen option of moving grain, each of the proposed technologies of accumulation is characterized by the corresponding cost of maintenance of the cargo flow. Therefore, the vector of total logistics costs of the corresponding transport scheme of transportation for the mathematical model (1) is written as

$$C = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_n \end{pmatrix}. \quad (6)$$

As is known from the theory of optimization, in such cases the system of equations $A_x = b$ is compatible, and the maximum number of linearly independent vectors A_j , $j = 1, \dots, n$ is equal to m . The final plan for the use of transport systems infrastructure was determined using the well-known Jordan-Gaussian exclusion method. Using the conditions of minimization of the objective function (1) and the matrix form of recording the limiting conditions (4)–(6) it becomes possible to conduct multivariate calculations to determine the priority areas for the formation of the appropriate infrastructure of customs and logistics systems.

As a result of generalization of a large number of possible schemes of movement of grain cargo flows it becomes possible to define the basic variants of use of an infrastructure of transport systems for creation of export party of cargoes. This technique has the advantages over the structure of the direct transport node, which allows for multivariate calculations of numerical values of the resulting indicators, considering the mutual influence of self-functioning elements. At the same time, such a scheme takes into account the peculiarities of the process of delivery of individual export consignments of grain, accumulation and temporary storage in stationary port elevators or watercraft. And the preliminary analysis of the existing options of transportation of grain with the involvement of different modes of transport and the using of elevator and warehousing enterprises gives grounds to differentiate the feasibility of using existing methods of delivery.

The total cost of logistics services for the maintenance of grain cargo flows in the export service is differentiated by the following components:

- services of grain-receiving enterprises;
- payment for transportation of goods by rail;
- additional railway transport services at the request of the customer;
- services of customs-licensed warehouses;
- services of port grain terminals or port elevators;

- the cost of transshipment operations in the seaport by the direct method of work;
- component of motor transport;
- cost of transshipment operations by ship-loading machines of the grain terminal;
- the cost of storing grain in cars on railway tracks;
- payment for the use of railway freight cars;
- payment under the terms of an additional agreement with the railway car service;
- freight toll of the sea trade port.

The cost of basic and additional services related to technological operations at the elevator and warehousing enterprises consists of differentiated acceptance of grain cargo from vehicles, storage for a specified period of time, drying, cleaning and other operations to bring grain to a certain date and technical conditions of storage, shipment of grain cargoes for further transportation. It should be noted that the amount of payment for these services depends on the state of transport infrastructure of enterprises and the state of grain cargo. The methodology for determining the functional characteristics of the customs and logistics infrastructure in transport hubs is illustrated by the example of production activities of the Nikolayev sea trade port (Fig. 2).

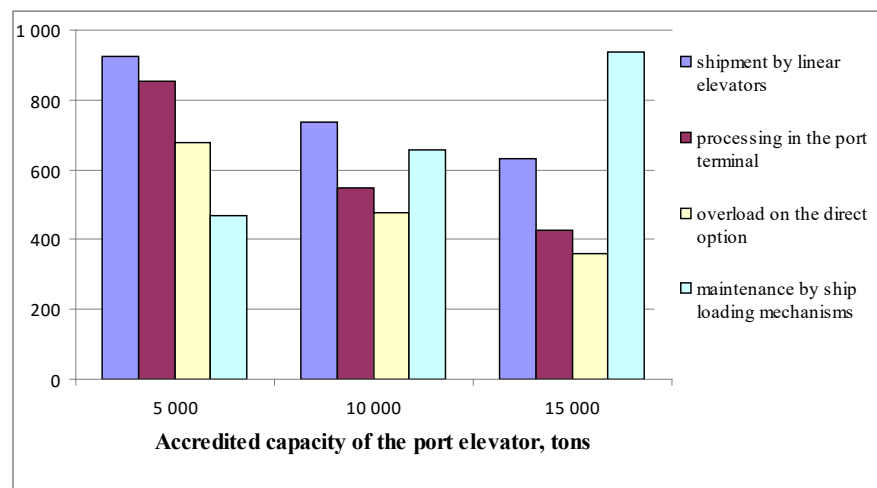


Fig. 2. Project daily productivity of the components of the customs and logistics system under the condition of loading the export batch of grain volume $P = 15\,000$ tons for 7 days, tons/day

The change in the design daily productivity of individual components of the customs and logistics system in the proposed example is explained primarily by the limitation of the service life of the export batch of grain, and, accordingly, the need for prior accumulation of these goods. Under such circumstances, the share of the scheme of movement of grain cargo flows under the option “linear elevator – railway transport – port elevator – sea vessel” increases. And taking into account these circumstances, a significant part of the hopper railway cars, which were previously used for grain storage, is released. As a result, when increasing the accredited capacity of the port elevator from $H = 5$ thousand tons to $H = 15$ thousand tons, the cost of customs and logistics services decreases by 12.9 %.

The presence of accredited capacities in the port elevator has a positive effect on reducing the daily intensity of the use of railway transport infrastructure. This situation is explained by the fact that increasing the time of consolidation of the contracted consignment optimizes the daily number of vehicles on the routes. For example, increasing the capacity of the port elevator from $H = 5$ thousand tons to $H = 15$ thousand tons reduces the average daily amount of grain shipped by elevators by 31.6 %. And given the complexity of ordering free hopper cars during the period of intensive grain exports, the identified trend is positive.

As we know, one of the important elements of the infrastructure of international transport systems is the capacity of the port railway station. This situation is largely due to the limited capabilities of the general exhaust track and the large volume and range of goods in the export direction. However, increasing the capacity of the port elevator significantly reduces the amount of grain cargo arriving through the port railway terminal. Thus, the change in the accredited capacity from $H = 5$ thousand tons to $H = 15$ thousand tons leads to a decrease in freight traffic for the port terminal by 49.8 %.

Increasing the accredited capacity in the port elevator also has a positive effect on the transfer process under the direct option. In this case, the loaded car is removed by a gantry crane from the railway carts and fixed over the open hatches of the bilker. After opening the lower hatches of the railway car, the grain is poured into the hold of the vessel. With an increase in the accreditation capacity of the port elevator H by 5 thousand tons of grain overload in the direct option is reduced by an average of 23.6 %.

However, the availability of sufficient grain in the port significantly increases the load of stationary mechanisms. Thus, the increase in the capacity of the port elevator from $H = 5$ thousand tons to $H = 15$ thousand tons requires a doubling (from 468 tons/day to 938 tons/day) of the productivity of ship loading mechanisms.

Conditions for the creation and maintenance of export consignments of larger grain cargoes are characterized by the presence of the customs and logistics system of infrastructure elements of much greater capacity. Determining the functional characteristics of this system in the transport hub is considered on the example of consolidation and loading on the ship in the Odessa sea trade port of the export consignment of grain volume $P = 40$ thousand tons for 5 days. In this case, line and port elevators, customs terminals, as well as railway and road vehicles interact systematically. The peculiarity of servicing this export batch is also that, along with stationary storage facilities, closed railway hopper cars are actively used as a temporary option for a short period of time. For this purpose, the numerical values of the main functional characteristics of the system were determined and the ways of using the existing infrastructure in the transport node were analyzed (Table 1).

It is known that the consolidation and transshipment of a significant amount of cargo on a seagoing ship for a limited amount of time requires the mandatory use of powerful transport capabilities of rail transport. Therefore, the change in the capacity of the grain terminal D for processing railway cars plays a key role in determining the numerical values of individual components of the system. Thus, increasing the processing intensity of railway cars (from $D = 50$ cars/day to $D = 80$ cars/day) stimulates the storage of grain cargo in hopper cars. And since these operations are performed in advance, in the period of direct loading of grain on the ship, the intensity of its shipment from the elevators

is significantly reduced. Thus, increasing the service intensity from $D = 50$ cars/day to $D = 80$ cars/day makes it possible to reduce the daily volume of grain cargo from linear elevators by 1660 tons compared to 3120 tons at the initial stage.

Table 1

Project functional characteristics of customs and logistics infrastructure in the transport hub when servicing grain cargo flows of international orientation

Indexes	Capacity of the grain terminal for processing railway cars, cars/day						
	50	55	60	65	70	75	80
Daily shipment volume from linear elevators, tons	3120	2830	2550	2280	2010	1730	1460
Accredited capacity of the customs terminal, thousands of tons	11.22	13.39	15.56	17.73	19.90	22.08	24.26
The optimal number of vehicles with maximum capacity, units	75	67	60	54	49	45	42
Capacity of the port elevator, thousands of tons	15.35	13.83	12.42	11.10	9.87	8.70	7.62
Logistic cost of cargo flow maintenance, €/tons	37.63	36.68	35.76	34.93	34.17	33.48	32.86

At the same time, the growth of D within these limits requires for the agreed export party more than twice (from $B = 11.22$ thousand tons to $B = 24.26$ thousand tons) increase the accreditation capacity of the customs terminal. This situation is explained by the fact that these infrastructure elements are located, as a rule, at a relatively short distance ($l = 30\text{--}50$ km), so the delivery of grain cargo to the port berths is intensively performed by shunting locomotives in batches of 6–8 railway cars.

The active use of prompt delivery of these volumes of grain directly to the loading mechanisms of the port reduces the need for costly use of capacities H of the port elevator. The performed calculations show that if the indicator D changes within the specified limits, the numerical value of the indicator H decreases by 7.73 thousand tons and is 7.62 thousand tons under the condition $D = 80$ cars/day.

Consolidation of significant volumes of export cargo requires a separate description of the peculiarities of the use of vehicles. Despite the fact that due to the relatively high cost of transport work, this type of transport is used over relatively short distances ($l \leq 200$ km), heavy road trains E ($q = 20$ t) significantly replenish the volume of the consolidated party. However, along with the increase in the intensity of the use of railway transport, the daily number of vehicles decreases from $E = 75$ units to $E = 42$ units of rolling stock. As a result, the optimization of the existing infrastructure of the customs and logistics system made it possible to reduce the total logistics cost of servicing the grain cargo flow from $B = 37.63$ €/tons for $D = 50$ cars/day to $B = 32.86$ €/tons for $D = 80$ cars/day.

The described methodology of formation of the customs and logistics infrastructure of integrated systems provides an opportunity to determine ways to create promising production facilities in transport hubs. However, the practical application of this methodology is based on taking into account certain features of transport services of international cargo flows. In determining the functional characteristics of the customs

and logistics infrastructure of transport systems should take into account the fact that the export of grain cargo is seasonal, and therefore performed, as a rule, from August to March next year. Therefore, in the inter-export period, part of the infrastructure elements is involved in other technological processes, and the other part of the port infrastructure is in forced downtime. This production situation should be taken into account when calculating the costs associated with the forced maintenance of a significant part of the specialized infrastructure of the transport hub.

Conclusions. In the process of conducting a study of the development of integration processes in the system of servicing export cargo flows, new results were obtained to improve the methodology for forming the customs and logistics infrastructure of transport hubs. On the basis of the basic provisions of the theory of the system analysis regularities of interaction of separate structural elements of industrial formations of the international direction are defined. It is established that when increasing the accreditation capacity of the port elevator by $\Delta H = 10$ thousand tons, the generalized logistics costs F decrease by 4.73 €/tons. The peculiarity of the results is that they take into account the possibility of using alternative methods of consolidation, storage and transshipment.

It is shown how the influencing factors take into account the peculiarities of the implementation of the necessary technological processes by different modes of transport. The obtained result of the reduction of the generalized logistical cost F in the maintenance of grain freight flows in transport hubs takes into account the increase in the intensity of the use of railway cars and the intensity of the use of other infrastructure elements.

It is determined how the functional characteristics of the customs and logistics infrastructure in transport systems affect the efficiency of freight traffic in international traffic. However, when calculating, in addition to the impact of resource provision of international transport, it is necessary to take into account the peculiarities of servicing cargo flows by different modes of transport, seasonality of grain transportation and characteristics of existing and promising consumer markets.

BIBLIOGRAPHY

1. Kulbovskiy I., Bakalinsky O., Sorochynska O., Kharuta V., Holub H., Skok P. Implementation of innovative technology for evaluating high-speed rail passenger transportation. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019. No. 6. Pp. 63–72.
2. Apfelst A., Dashkovskiy S., Nieberding B. Modeling, optimization and solving strategies for matching problems in cooperative full truckload networks. *IFAC Papers OnLine*. 2016. Vol. 49. Issue 2. Pp. 18–26. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.03.004>
3. Danchuk V., Bakulich O., Svatko V. Identifying optimal location and necessary quantity of warehouses in logistic system using a radiation therapy method, *Transport*. 2019. Vol. 34. No. 2. Pp. 175–186.
4. Taji T., Tanigawa S.-I., Kamiyama N., Katoh N., Takizawa A. Finding an optimal location of line facility using evolutionary algorithm and integer program. *Journal of Computational Science and Technology*. 2008. No. 2 (3). Pp. 362–370.

5. Prokudin G., Remekh K., Maidanyk K. The efficiency of the runsystem application in international freight transportation. *Politechnika Rzeszowska*. 2017. No. 10. Pp. 79–86.
6. Dai B., Chen H. A multi-agent and auction-based framework and approach for carrier collaboration. *Logistics Research*. 2011. No. 3 (2–3). С. 101–120.
7. Shin S., Roh H.-S., Hur S. Characteristics Analysis of Freight Mode Choice Model According to the Introduction of a New Freight Transport System. *Sustainability*. 2019. Vol. 11 (4). 1209 p.
8. Lebid I., Luzhanska N., Kotsiuk O. Technical Support for Freight Customs Complex Operation. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля* : науковий журнал. 2019. Вип. 2 (250). С. 7–11.
9. Sonmez A. D., Lim G. J. A decomposition approach for facility location and relocation problem with uncertain number of future facilities. *European Journal of Operational Research*. 2012. Vol. 218. No. 2. Pp. 327–338.
10. Vorkut T., Volynets L., Bilonog O., Sopotsko O., Levchenko I. The model to optimize deliveries of perishable food products in supply chains. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. No. 5. Pp. 43–50.
11. Crainic T., Perboli G., Rosano M. Simulation of intermodal freight transportation systems: a taxonomy. *European Journal of Operational Research*. 2018. Vol. 270. No. 2. Pp. 401–418.
12. Ritzinger U., Puchinger J., Hartl R. A survey on dynamic and stochastic vehicle routing problems. *International Journal of Production Research*. 2015. Vol. 54. No. 1. Pp. 215–231.

REFERENCES

1. Kulbovskiy, I., Bakalinsky, O., Sorochynska, O., Kharuta, V., Holub, H., & Skok, P. (2019). Implementation of innovative technology for evaluating high-speed rail passenger transportation. *EUREKA: Physics and Engineering*. 6, 63–72.
2. Apfelst, A., Dashkovskiy, S., & Nieberding, B. (2016). Modeling, optimization and solving strategies for matching problems in cooperative full truckload networks. *IFAC Papers OnLine*. 49 (Issue 2), 18–26. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.03.004>
3. Danchuk, V., Bakulich O., & Svatko, V. (2019). Identifying optimal location and necessary quantity of warehouses in logistic system using a radiation therapy method. *Transport*. 34 (2), 175–186.
4. Taji, T., Tanigawa, S.-I., Kamiyama, N., Katoh, N., & Takizawa, A. (2008). Finding an optimal location of line facility using evolutionary algorithm and integer program. *Journal of Computational Science and Technology*. 2 (3). 362–370.
5. Prokudin, G., Remekh, K., & Maidanyk, K. (2017). The efficiency of the runsystem application in international freight transportation. *Politechnika Rzeszowska*. 10, 79–86.

6. Dai, B., & Chen, H. (2011). A multi-agent and auction-based framework and approach for carrier collaboration. *Logistics Research*. 3 (2–3), 101–120.
7. Shin, S., Roh, H.-S., & Hur, S. (2019). Characteristics Analysis of Freight Mode Choice Model According to the Introduction of a New Freight Transport System. *Sustainability*. 11 (4). 1209 p.
8. Lebid, I., Luzhanska, N., & Kotsiuk, O. (2019). Technical Support for Freight Customs Complex Operation. *Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University: Scientific Journal*. 2 (250), 7–11.
9. Sonmez, A. D., & Lim, G. J. (2012). A decomposition approach for facility location and relocation problem with uncertain number of future facilities. *European Journal of Operational Research*. 218 (2), 327–338.
10. Vorkut, T., Volynets, L., Bilonog, O., Sopotsko, O., & Levchenko, I. (2019). The model to optimize deliveries of perishable food products in supply chains. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 5, 43–50.
11. Crainic, T., Perboli, G., & Rosano, M. (2018). Simulation of intermodal freight transportation systems: a taxonomy. *European Journal of Operational Research*. 270 (2), 401–418.
12. Ritzinger, U., Puchinger, J., & Hartl, R. (2015). A survey on dynamic and stochastic vehicle routing problems. *International Journal of Production Research*. 54 (1), 215–231.

**ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО МОДЕЛЮВАННЯ
ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ТРИВАЛОСТІ ПЕРЕБУВАННЯ
ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ НА ЗУПИНЦІ
ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ**

М.М. Жук¹, Г.В. Півторак², І.І. Гіць³

¹к. т. н., доцент кафедри транспортних технологій,
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна
ORCID ID: 0000-0003-1989-1053

²к. т. н., ст. викл. кафедри транспортних технологій,
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна
ORCID ID: 0000-0003-3645-1586

³аспірант, асистент кафедри транспортних технологій,
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна
ORCID ID: 0000-0002-7081-438X

Анотація

Вступ. Підвищення попиту на громадський транспорт серед міського населення можна досягнути комплексом різних заходів, одним з яких є вдосконалення системи перевезень та підвищення якості обслуговування пасажирів на різних ланках перевізного процесу. Сучасні методи опрацювання та аналізу параметрів функціонування транспортних систем дозволяють оцінити вплив різноманітних чинників на транспортні процеси та спрогнозувати результати такого впливу. Більшість транспортних процесів мають стохастичну, нелінійну структуру. У таких випадках доцільно використовувати методи штучного інтелекту, зокрема штучні нейронні мережі. **Мета.** Метою статті є визначення тривалості перебування транспортного засобу на зупинці громадського транспорту з використанням нейромережевого моделювання. **Результати.** У роботі розкрито основні принципи функціонування штучних нейронних мереж та правила їх використання. Проаналізовано доцільність застосування нейромережевого моделювання для прогнозування тривалості перебування транспортного засобу на зупинках громадського транспорту. Зокрема, проаналізовано вплив таких чинників, як: довжина маршруту, відстань від початку маршруту до досліджуваної зупинки, інтервал між транспортними засобами певного маршруту та пасажирообмін на зупинці. На основі зібраної під час натурних спостережень інформації в програмному середовищі Deductor створено нейронну мережу та проведено прогнозування тривалості перебування транспортного засобу на зупинці. Проведено оцінку якості отриманої моделі. **Висновки.** Нейромережеве моделювання є ефективним інструментом для дослідження транспортних процесів. Отримані результати свідчать про достатню точність отриманої моделі (середня тривалість перебування транспортного засобу на зупинці становить 24 с у ранковий період та 21 с – в обідній, відхилення в межах від 5 до 9,6 %).

Подальші дослідження спрямовуватимуться на підвищення точності моделі шляхом, зокрема, розширення переліку вхідних параметрів.

Ключові слова: громадський транспорт, штучна нейронна мережа, тривалість перебування, моделювання.

APPLICATION OF NEURAL NETWORK MODELING TO FORECASTING THE VEHICLE STAY DURATION AT THE PUBLIC TRANSPORT STOP

M.M. Zhuk¹, H.V. Pivtorak², I.I. Hits³

¹Ph.D., Associate Professor at the Department of Transport Technologies,
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-1989-1053

²Ph.D., Senior Lecturer at the Department of Transport Technologies,
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-3645-1586

³Graduate, Assistant at the Department of Transport Technologies,
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-7081-438X

Summary

Introduction. Increasing the demand for public transport among the urban population can be achieved through a set of various measures, one of which is to improve the transportation system and improve the quality of passenger service at various stages of the transportation process. Modern methods of elaboration and analysis of parameters of functioning of transport systems allow to estimate the influence of various factors on transport processes and to predict results of such influence. Most transport processes have a stochastic, nonlinear structure. In such cases, it is advisable to use methods of artificial intelligence, in particular artificial neural networks. **Purpose.** The purpose of the article is to determine the duration of vehicle stay at a public transport stop, using neural network modeling. **Results.** The basic principles of functioning of artificial neural networks and rules of their use are revealed in the work. The expediency of using neural network modeling to predict the stay duration of a vehicle at public transport stops is analyzed. In particular, the influence of the following factors was analyzed: route length, distance from the beginning of the route to the researched stop, the interval between vehicles of a certain route and passenger exchange at the stop. Based on the information collected during field observations, a neural network was created and the duration of the vehicle's stay at the stop was predicted in the Deductor software environment. The quality of the obtained model was evaluated. **Conclusions.** Neural network modeling is an effective tool for studying transport processes. The obtained results testify to the sufficient accuracy of the obtained model (the average stay duration of the vehicle at the stop is 24 s in the morning and 21 s in the lunch period, deviation in the range from 5 to 9.6 %). Further research will focus on improving the accuracy of the model by, in particular, expanding the list of input parameters.

Key words: public transport, artificial neural network, downtime, modelling.

Вступ. Плани сталої мобільності міст передбачають впровадження заходів, які би стимулювали підвищення попиту на переміщення громадським транспортом,

зміщуючи розподіл між видами переміщень у місті на користь сталої мобільності. Вдосконалення системи громадського транспорту передбачає наявність інформації про параметри її функціонування та адекватне опрацювання і поширення цієї інформації. Використання сучасних методів моделювання дозволяє оцінити вплив різноманітних чинників на транспортні процеси та спрогнозувати результати такого впливу.

Постановка проблеми. Побудова математичної моделі на основі результатів спостережень є одним з основних інструментів прийняття рішень у різних сферах. Проте багато транспортних процесів мають стохастичну, нелінійну структуру, тому використання для їх опису традиційних статистичних моделей є неефективним [1, с. 1]. У таких випадках доцільно використовувати методи, засновані на штучному інтелекті, зокрема штучні нейронні мережі. Нейромережеві технології є ефективними для розв'язання задач класифікації, кластеризації, прогнозування, пошуку основних компонент вибірки тощо [2, с. 5; 3, с. 18309].

Тривалість оберту на маршруті громадського транспорту складається з чотирьох основних елементів: перебування транспортних засобів на проміжних зупинкових пунктах, затримки на перехрестях, руху на перегонах та простою на кінцевих зупинках маршруту [4, с. 86]. Тривалість перебування транспортного засобу на зупинці впливає на функціонування як маршруту громадського пасажирського транспорту, так і зупинки [5, с. 17]. Знання чинників, які впливають на цей показник, та розуміння способу і ступеня їх впливу дасть змогу покращити процес обслуговування пасажирів на зупинці та зменшити вплив транспортних засобів, що на ній перебувають, на загальний транспортний потік.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання нейронних мереж для розв'язання задач транспортної галузі є новим та досить ефективним, що підтверджується як закордонними, так і українськими дослідженнями. Зокрема, в праці [6] автор використовує цей алгоритм для прогнозування вантажних потоків у межах регіонального транспортного комплексу. Роботи [7–8] пов'язані із застосуванням нейронних мереж для прогнозування транспортних потоків. Автори [9] застосовують прогнозування з використанням просторово-часової нейронної мережі для визначення попиту на використання таксі та прокату велосипедів. У праці [10] проводиться оцінка пасажиропотоку у системі громадського транспорту з використанням згорткових нейронних мереж. Автори [11] використовують нейронну мережу для моделювання пішохідних потоків у районах транспортних вузлів.

Застосування нейронних мереж для визначення способів переміщення людей у транспортних мережах також є досить ефективним, що підтверджується працями [12–14].

Детальний огляд літературних джерел щодо застосування нейронних мереж для розв'язання задач, пов'язаних з громадським транспортом, подано в праці [15].

Формулювання цілей статті. Метою статті є визначення тривалості перебування транспортного засобу на зупинці громадського транспорту з використанням нейромережевого моделювання.

Виклад основного матеріалу. Штучна нейронна мережа – це сукупність штучних нейронів, сформованих шарами, кожен з яких має певну кількість входів та один вихід (їх називають дендритами та аксоном відповідно) [16, с. 152].

Кожен з цих нейронів перетворює вхідні сигнали (інформацію, що надходить із зовнішніх джерел або від інших нейронів) у вихідний сигнал, використовуючи певну функцію перетворення. Оскільки вхідні сигнали є нерівнозначними за важливістю, то їх пріоритетність визначається за допомогою вагових коефіцієнтів [17, с. 412].

Схема кібернетичної моделі нейрона подана на рис. 1 [16, с. 153]. На вхід нейрона надходить інформація у вигляді сигналів x_i , кожен з яких має свій ваговий

коефіцієнт ω_i . Зважена сума сигналів $P = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot x_i$ з допомогою передавальної

функції $f(P)$ перетворюється на вихідний сигнал нейрона Y . Передавальна функція може набувати вигляду лінійної, ступінчастої або нелінійної (сигмоїдальної) [18, с. 46]. Вигляд цієї функції є найважливішою характеристикою нейрона.

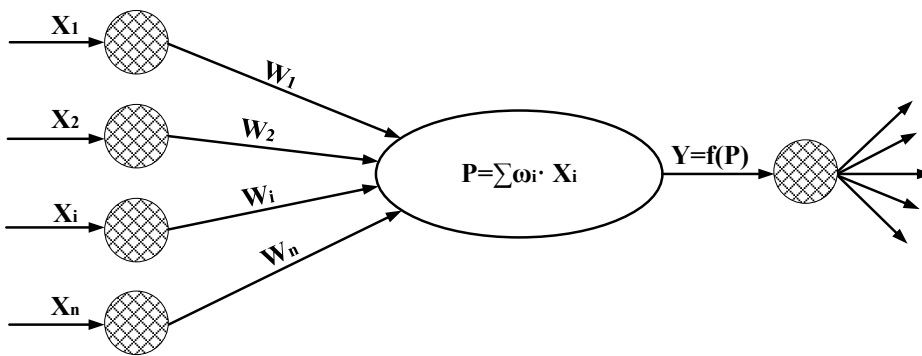


Рис. 1. Схема кібернетичної моделі нейрона (за [16])

Використання нейромереж передбачає виконання кількох послідовних кроків [2, с. 25; 16, с. 160]:

- вибір вхідних даних та формування навчальної вибірки;
- нормування вхідних та вихідних чинників;
- формування архітектури штучної нейронної мережі (визначення типу, кількості шарів та кількості нейронів у кожному шарі);
- навчання штучної нейронної мережі, що дозволяє, зокрема, уточнити значення вагових коефіцієнтів;
- тестування отриманої моделі на незалежній вибірці та отримання результату.

За структурою (архітектурою) нейронні мережі поділяються на три основні класи: одношарові мережі прямого поширення, багатошарові мережі прямого поширення та рекурентні мережі [18, с. 55]. Найбільш поширеними формами нейронних мереж є багатошаровий перспетрон, мережа радіальної базисної функції, мережа адаптивної резонансної теорії, ймовірнісна мережа, асоціативна мережа та топографічна карта Кохонена [19, с. 171]. Архітектура ШНР є дуже важливим елементом для створення точної, ефективною, надійної моделі [20, с. 2]. Вибір архітектури мережі доцільно проводити окремо для кожного типу задач з урахуванням наявної початкової статистичної інформації [21, с. 149].

Вибірка початкових даних складається з результатів досліджень, проведених на 15 зупинках громадського транспорту м. Львова окремо в ранковий піковий (113 значень) та обідній міжпіковий (111 значень) періоди часу. Під час проведення досліджень фіксувався час прибуття кожного маршруту, тривалість перебування на зупинці та кількість пасажирів, що здійснюють посадку та висадку на зупинці. У результаті опрацювання наявних даних визначено чотири вхідні параметри, які можуть впливати на тривалість перебування на зупинці: загальна довжина маршруту, відстань від початку маршруту до досліджуваної зупинки, інтервал між транспортними засобами певного маршруту та пасажирообмін на зупинці (сума кількості пасажирів, що здійснюють посадку та висадку).

Для дослідження використовується програмний пакет Deductor Academic.

Для визначення важливості кожного з чинників та усунення тих, які не мають значущого впливу на результуючий показник, проведено кореляційний аналіз (рис. 2):

Входные поля	Корреляция с выходными полями	
	t	
<input type="checkbox"/> L		-0,006
<input checked="" type="checkbox"/> %		-0,188
<input checked="" type="checkbox"/> I		0,065
<input checked="" type="checkbox"/> P		0,393

а)

Входные поля	Корреляция с выходными полями	
	T	
<input checked="" type="checkbox"/> L		-0,142
<input checked="" type="checkbox"/> %		-0,186
<input type="checkbox"/> I		0,020
<input checked="" type="checkbox"/> P		0,391

б)

Рис. 2. Результати проведення кореляційного аналізу вхідних параметрів у Deductor Academic: а) дані ранкового періоду; б) дані обіднього періоду

На середню тривалість перебування транспортного засобу на зупинці ГПТ у ранковий період не має значущого впливу довжина маршруту, а в обідній період – інтервал руху на маршруті. Зростання пасажирообміну очікувано збільшує тривалість перебування, близькість зупинки до кінця маршруту – зменшує.

У досліджуваному випадку в Deductor Academic використовується нейронна мережа типу багатошаровий перспетрон з трьома входами, одним прихованим шаром та одним виходом і сигмоїдальною активаційною функцією (рис. 3).

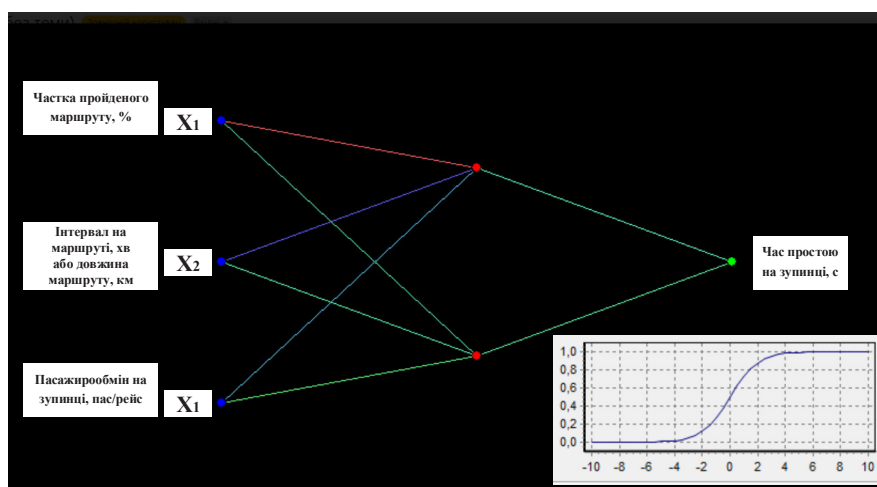


Рис. 3. Граф неймережі та вигляд активаційної функції

У результаті моделювання отримано діаграми розсіювання вхідних та еталонних значень тривалостей перебування окремо для ранкового та обіднього періодів (рис. 4, 5).

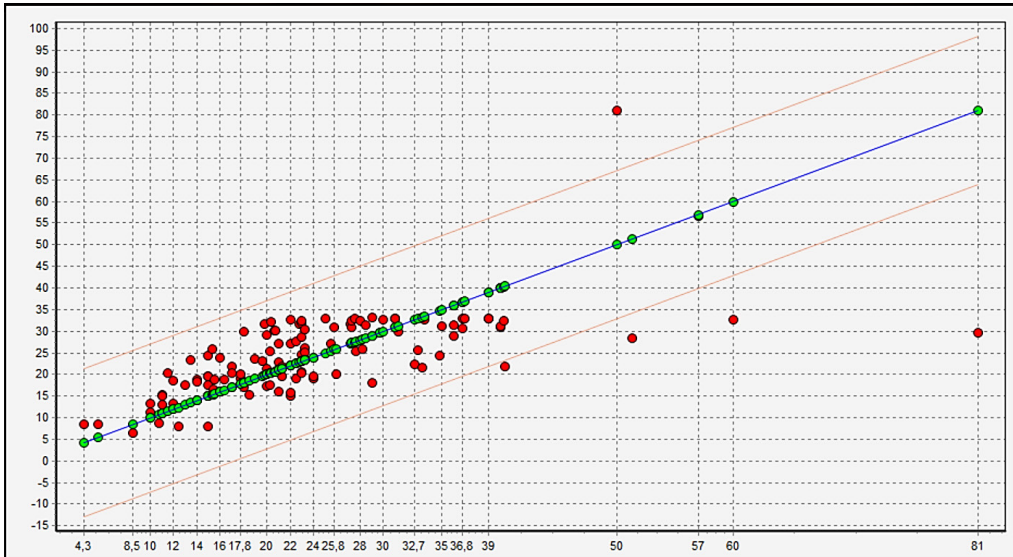


Рис. 4. Діаграма розсіювання тривалостей перебування ТЗ на зупинці ГПТ у ранковий період

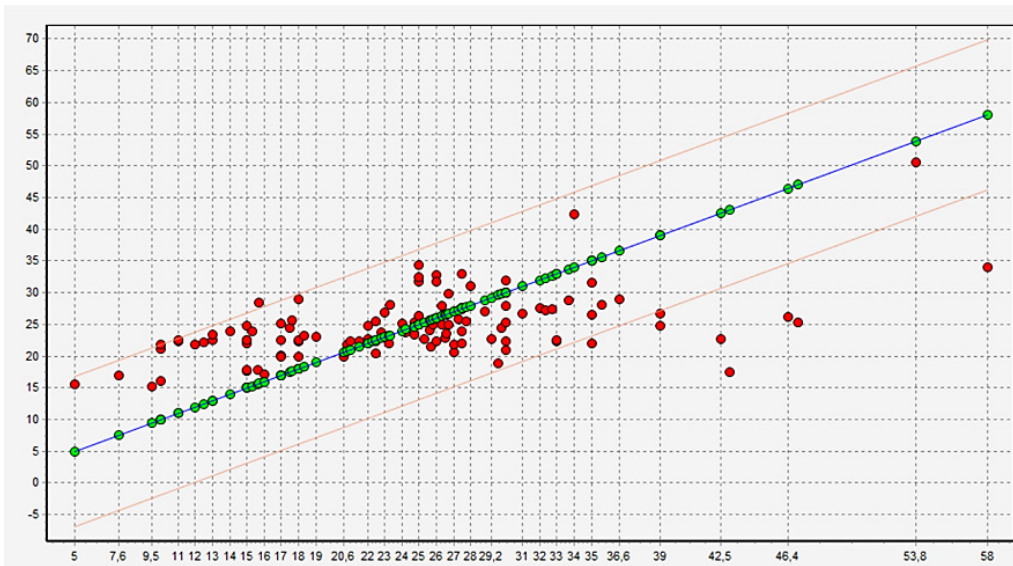


Рис. 5. Діаграма розсіювання тривалостей перебування ТЗ на зупинці ГПТ в обідній період

Підсумкова оцінка якості моделі подана на рис. 6–7, підсумкові статистичні показники зведено в таблицю 1.

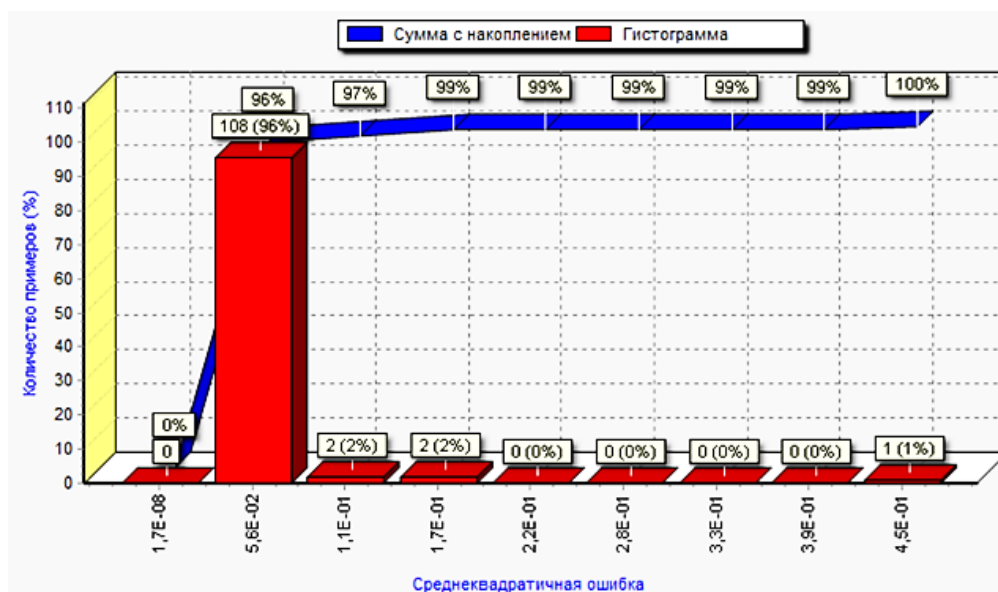


Рис. 6. Оцінка якості отриманої моделі прогнозування тривалостей перебування ТЗ на зупинці ГПТ у ранковий період

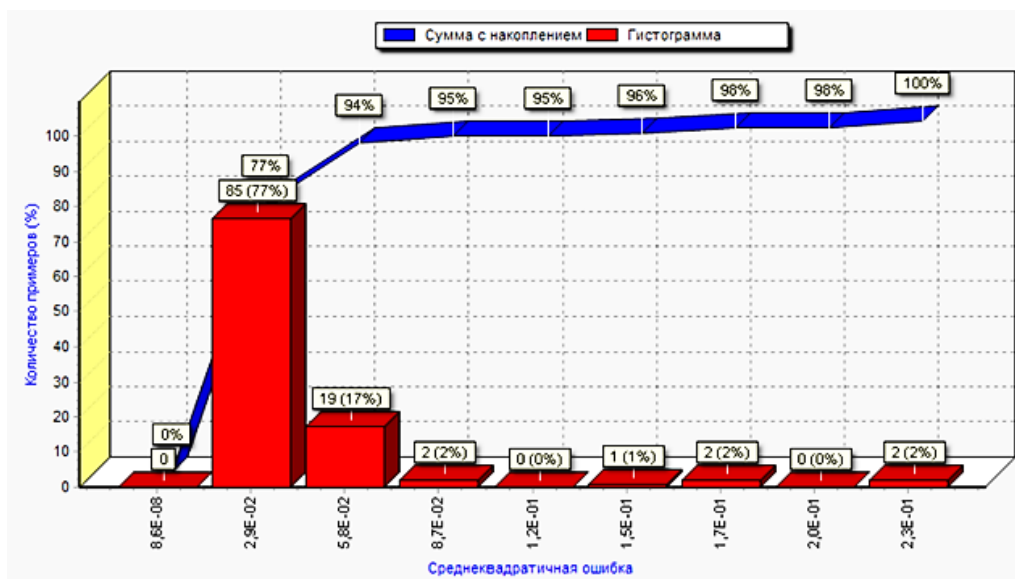


Рис. 7. Оцінка якості отриманої моделі прогнозування тривалостей перебування ТЗ на зупинці ГПТ в обідній період

85 % отриманих значень тривалостей перебування транспортного засобу ГТ на зупинці перебувають у межах від 10 до 37 с у ранковий період та від 10 до 30 с – в обідній період. Отримані результати свідчать про досить високу точність моделювання. Проведення додаткових досліджень з метою збору більшої кількості інформації дасть змогу ввести в модель додаткові вхідні параметри, що розширить можливості аналізу та оцінки отриманих результатів.

Таблиця 1

Статистичні показники моделювання

Показник	Мінімальне значення	Максимальне значення	Середнє значення	Стандартне відхилення
Ранковий період				
Відсоток пройденого шляху, %	4,4	100	48,7	25,7
Інтервал між ТЗ на маршруті, хв	4,5	56	15	9,05
Пасажиरोобмін на зупинці, пас/рейс	1	118	16	18
Тривалість перебування на зупинці (вхідні дані), с	4	81	24	11,6
Тривалість перебування на зупинці (моделювання), с	6	81	24	9,6
Обідній період				
Довжина маршруту, км	3,27	26,14	13,9	5,3
Відсоток пройденого шляху, %	4,4	100	48,3	25,9
Пасажирообмін на зупинці, пас/рейс	1	96	14	15,4
Тривалість перебування на зупинці (вхідні дані), с	5	58	21	9,3
Тривалість перебування на зупинці (моделювання), с	5	50	21	4,99

Висновки. Сучасні інформаційні та комунікаційні технології дають усе більше можливостей для збору інформації про транспортну систему загалом та інформування учасників транспортного процесу щодо її функціонування. Якісний аналіз наявних даних дозволяє визначити показники функціонування системи та запропонувати ефективні рішення для її вдосконалення. Застосування нейромережевого моделювання є ефективним для визначення чинників впливу на елементи транспортної системи, прогнозування її параметрів тощо. Проведені дослідження дають можливість прогнозувати середню тривалість перебування транспортного засобу на зупинці ГПТ та формувати прогнозні моделі функціонування елементів пасажирської транспортної системи. Отримані результати свідчать про достатню точність моделі (відхилення перебуває в межах від 5 до 9,6 %). Подальші дослідження передбачають розширення переліку вхідних параметрів для підвищення точності моделі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кветний Р. Н., Кабачій В. В., Чумаченко О. О. Імовірнісні нейронні мережі в задачах ідентифікації часових рядів. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2010. № 3. 6 с. URL: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/4609/219.pdf?sequence=3> (дата звернення: 04.02.2022).
2. Кириченко А. А. Нейропакеты – современный интеллектуальный инструмент исследователя. 2013. 297 с.
3. Waleed Khalid Shihab, Sivaram Prasad. Artificial neural network. *International Journal of Scientific Research*. 2022. Vol. 8, Issue 7, pp. 18307–18328. DOI: 10.24327/ijrsr.2017.0807.0485

4. Вакуленко К. Є., Доля К. В. Управління міським пасажирським транспортом : навчальний посібник. Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків, 2015. 257 с.
5. Півторак Г. В. Дослідження тривалості простою маршрутних транспортних засобів на зупинках громадського транспорту Львова. *Автомобіляховик України*. 2019. № 2. С. 17–23.
6. Яблоков І. В. Логістичні принципи прогнозування розподілу транспортних потоків на основі нейронних мереж. *Економіко-математичне моделювання соціально-економічних систем*. 2009. Вип. 14. С. 144–149.
7. Kang D., Lv Y. and Chen Y. Short-term traffic flow prediction with LSTM recurrent neural network. *IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. 2017. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/ITSC.2017.8317872
8. Panovski D., Scurtu V. and Zaharia T. A Neural Network-based Approach for Public Transportation Prediction with Traffic Density Matrix. *7th European Workshop on Visual Information Processing (EUVIP)*. 2018. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/EUVIP.2018.8611683
9. Junchen Ye, Leilei Sun, Bowen Du, Yanjie Fu, Xinran Tong, Hui Xiong. Co-Prediction of Multiple Transportation Demands Based on Deep Spatio-Temporal Neural Network. *In Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining (KDD '19)*. 2019. Association for Computing Machinery, New York, USA, 305–313. DOI: <https://doi.org/10.1145/3292500.3330887>
10. Liu Guojin, Yin Zhenzhi, Jia Yunjian, Xie Yulaib. Passenger flow estimation based on convolutional neural network in public transportation system. *Knowledge-Based Systems*. 2017. Volume 123, 1. P. 102–115.
11. Shuwei Wang, Ronggui Zhou, Lin Zhao. Forecasting Beijing Transportation Hub Areas's Pedestrian Flow Using Modular Neural Network. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2015. Vol. 2015, Article ID 749181. 6 p. URL: <https://doi.org/10.1155/2015/749181>
12. Liang X., Wang G. A Convolutional Neural Network for Transportation Mode Detection Based on Smartphone Platform. *IEEE 14th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS)*. 2017. Pp. 338–342. DOI: 10.1109/MASS.2017.81
13. Fang S., Fei Y., Xu Z. and Tsao Y. Learning Transportation Modes From Smartphone Sensors Based on Deep Neural Network. *IEEE Sensors Journal*. 2017. Vol. 17, No. 18. Pp. 6111–6118. DOI: 10.1109/JSEN.2017.2737825
14. Ana Alice Peregrino, Zhicheng Liu, Nivan Ferreira, Fabio Miranda. Transportation Scenario Planning with Graph Neural Networks. *Conference: 10th International Workshop on Urban Computing*. 2021. P. 1–5.
15. Pekel E., Selin Soner Kara. A comprehensive review for artificial neural network application to public transportation. *Sigma: Journal of Engineering & Natural Sciences*. 2017. Vol. 35 (1). P. 157–179.

16. Аулін В. В., Гриньків А. В., Головатий А. О., Лисенко С. В., Голуб Д. В., Кузик О. В., Тихий А. А. Методологічні основи проектування та функціонування інтелектуальних транспортних і виробничих систем : монографія / під заг. ред. д. т. н., проф. Ауліна В. В. Кропивницький : Видавець Лисенко В. Ф., 2020. 428 с.
17. Amey Thakur, Archit Konde. Fundamentals of Neural Networks. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*. 2021. Volume 9. Issue VIII. P. 407–426.
18. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание / Пер. с англ. Издательский дом Вильямс, 2006. 1104 с.
19. Терейковський І. А. Критерії вибору архітектури нейронної мережі для розв'язання задач із захисту інформації. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2011. № 717. С. 168–177.
20. Pam Mantri, John Thomas. Design of Neural Networks. *The 14th International Conference on Axiomatic Design (ICAD 2021)*. 2021. 1174 (2021). P. 1–16.
21. Савіна С. С., Бень В. П. Вибір архітектури нейромережі для розв'язання задачі класифікації надійності позичальників-фізичних осіб. *Нейро-нечіткі технології моделювання в економіці*. 2016. № 5. С. 124–151.

REFERENCES

1. Kvietyni, R. N., Kabachii, V. V., Chumachenko, O. O. (2010). Probabilistic neural networks in time series identification problems [Imovirnisni neironni merezhi v zadachakh identyfikatsii chasovykh riadiv]. *Naukovi pratsi Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, 3. 6. Retrieved from: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/4609/219.pdf?sequence=3> [in Ukrainian]
2. Kyrychenko, A. A. (2013). Neuropackages – a modern intellectual tool for a researcher [Neiropakety – sovremennyyi intellektualnyi instrument issledovatel'ia]. 297. [in Russian]
3. Waleed Khalid Shihab, Sivaram Prasad. (2022). Artificial neural network. *International Journal of Scientific Research*. 8 (7). 18307–18328. DOI: 10.24327/ijrsr.2017.0807.0485
4. Vakulenko, K. Ie., Dolia, K. V. (2015). Urban passenger transport management [Upravlinnia miskym pasazhyrskym transportom: navchalnyi posibnyk]. Kharkiv. nats. un-t misk. hosp-va im. O. M. Beketova. Kharkiv. 257.
5. Pivtorak, H. V. (2019). Research of the downtime of public transport vehicles at stop in Lviv [Doslidzhennia tryvalosti prostoiu marshrutnykh transportnykh zasobiv na zupynkakh hromadskoho transportu Lvova]. *Avtoshliakhovyk Ukrainy*. 2. 17–23. [in Ukrainian]
6. Yablokov, I. V. (2009). Logistic principles of forecasting the distribution of transport flows based on neural networks [Lohistychni pryntsypy prohozuvannia rozpodilu transportnykh potokiv na osnovi neironnykh

- merezh]. *Ekonomiko-matematychne modeliuвання sotsialno-ekonomichnykh system*. 14. 144–149. [in Ukrainian]
7. Kang, D., Lv, Y. and Chen, Y. (2017). Short-term traffic flow prediction with LSTM recurrent neural network. *IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. 1–6. DOI: 10.1109/ITSC.2017.8317872
 8. Panovski, D., Scurtu, V. and Zaharia, T. (2018). A Neural Network-based Approach for Public Transportation Prediction with Traffic Density Matrix. *7th European Workshop on Visual Information Processing (EUVIP)*. 1–6. DOI: 10.1109/EUVIP.2018.8611683
 9. Junchen, Ye, Leilei, Sun, Bowen, Du, Yanjie, Fu, Xinran, Tong, Hui, Xiong (2019). Co-Prediction of Multiple Transportation Demands Based on Deep Spatio-Temporal Neural Network. *In Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining (KDD '19)*. 305–313. DOI: <https://doi.org/10.1145/3292500.3330887>
 10. Liu, Guojin, Yin, Zhenzhi, Jia, Yunjian, Xie, Yulaib. (2017). Passenger flow estimation based on convolutional neural network in public transportation system. *Knowledge-Based Systems*. 123/1. 102–115.
 11. Shuwei, Wang, Ronggui, Zhou, Lin, Zhao. (2015). Forecasting Beijing Transportation Hub Areas's Pedestrian Flow Using Modular Neural Network. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2015, Article ID 749181. 6. Retrieved from: <https://doi.org/10.1155/2015/749181>
 12. Liang, X., Wang, G. (2017). A Convolutional Neural Network for Transportation Mode Detection Based on Smartphone Platform. *IEEE 14th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS)*. 338–342. DOI: 10.1109/MASS.2017.81
 13. Fang, S., Fei, Y., Xu, Z. and Tsao, Y. (2017). Learning Transportation Modes From Smartphone Sensors Based on Deep Neural Network. *IEEE Sensors Journal*. 17/18. 6111–6118. DOI: 10.1109/JSEN.2017.2737825
 14. Ana Alice Peregrino, Zhicheng Liu, Nivan Ferreira, Fabio Miranda. (2021). Transportation Scenario Planning with Graph Neural Networks. *Conference: 10th International Workshop on Urban Computing*. 1–5.
 15. Pekel, E., Selin Soner Kara. (2017). A comprehensive review for artificial neural network application to public transportation. *Sigma: Journal of Engineering & Natural Sciences*. 35 (1). 157–179.
 16. Aulin, V. V., Hrynkiv, A. V., Holovaty, A. O., Lysenko, S. V., Holub, D. V., Kuzyk, O. V., Tykhyi, A. A. (2020). Methodological bases of design and functioning of intelligent transport and production systems: monograph [Metodolohichni osnovy proektuvannya ta funktsionuvannya intelektualnykh transportnykh i vyrobnychykh system: monohrafiya]. Kropyvnytskyi: Vydavets Lysenko V. F. 428.
 17. Amey Thakur, Archit Konde. (2021). Fundamentals of Neural Networks. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*. 9 (VIII). 407–426.
 18. Khaikin, S. (2006). Neural networks: complete course [Neironnye seti: polnyi kurs]. Izdatelskii dom Viliams. 1104.

19. Tereikovskiy, I. A. (2011). Criteria for choosing a neural network architecture to solve information security problems [Kryterii vyboru arkhitektury neuronnoi merezhi dlia rozviazannia zadach z zakhystu informatsii]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politehnika"*. 717. 168–177.
20. Pam Mantri, John Thomas. (2021). Design of Neural Networks. *The 14th International Conference on Axiomatic Design (ICAD 2021)*. 1174 (2021). 1–16.
21. Savina, S. S., Ben, V. P. (2016). Selection of neural network architecture for solving problem of borrowers-individuals trustability classification [Vybir arkhitektury neiromerezhi dlia rozviazannia zadachi klasyfikatsii nadiinosti pozychalnykiv-fizychnykh osib]. *Neiro-nechitki tekhnolohii modeliuвання v ekonomitsi*. 5. 124–151.

**ВПЛИВ КАРАНТИННИХ ОБМЕЖЕНЬ, ВИКЛИКАНИХ
ЕПІДЕМІЄЮ COVID-19, НА ІНТЕНСИВНІСТЬ
ТРАНСПОРТНОГО РУХУ ТА ЕКОЛОГІЧНИЙ СТАН У М. ЛУЦЬКУ**

В.В. Федонюк¹, В.В. Іванців², М.А. Федонюк³

¹к. геогр. н., доцент кафедри екології та агрономії,
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-1880-6710

²к. іст. н., завідувач кафедри екології та агрономії,
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-4710-3245

³к. геогр. н., доцент кафедри екології та агрономії,
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-4034-3695

Анотація

Вступ. Актуальним питанням є дослідження екологічного впливу автомобільного транспорту в містах та розроблення шляхів зменшення такого впливу. Автотранспорт – це найбільш потужне джерело забруднення атмосферного повітря в місті. Автомобілі зумовлюють також низку негативних видів фізичного впливу на довкілля (шумове, вібраційне, електромагнітне забруднення). В умовах пандемії та загальнодержавного карантину з'явилася можливість оцінити, наскільки змінюються негативні чинники автотранспортного екологічного впливу у процесі скорочення обсягу перевезень та руху транспортних засобів. **Метою** дослідження стало проведення комплексної оцінки змін у структурі, динаміці, інтенсивності автотранспортного навантаження в м. Луцьку та екологічного впливу цих змін в умовах запровадженого загальнонаціонального карантину навесні 2020 р. **Результати.** Унаслідок проведення комплексу вимірювально-обчислювальних робіт на п'яти дослідних ділянках автомагістралей у м. Луцьку ми визначили зміни в динаміці та структурі автотранспортного трафіку, а також зміни таких показників автотранспортного впливу на екосистеми: 1) обсяги викидів у повітря сполук CO_x (вуглекислий газ і чадний газ у сумі, або оксиди карбону); 2) шумове навантаження на ділянці автомагістралі (стандартна акустична характеристика й акустична характеристика на довільній відстані). Встановлено, що зменшення негативних чинників екологічного впливу в разі зниження інтенсивності автотрафіку відбувається нелінійно. За послаблення автотрафіку у 2–3 рази викиди оксидів карбону скорочуються на 60–70 %, величини акустичних характеристик зменшуються лише на 10–15 %. **Висновки.** Отже, встановлено суттєве зниження наявних у докарантинний період перевищень за вмістом оксидів карбону у викидах автотранспорту та за рівнями шумового забруднення довкілля в Луцьку. Фактичні концентрації оксидів карбону на ділянках, що прилягають до автомагістралі, зменшилися до нормативних, акустична характеристика в житлових мікрорайонах була нижчою за норматив

протягом доби. Таким чином, запровадження карантинних обмежувальних заходів у країні суттєво послабило негативний екологічний вплив автотранспортних систем на екосистеми, адже результати, отримані для м. Луцька, можна екстраполювати й на інші міста, що мають схожу конфігурацію та завантаженість транспортних систем.

Ключові слова: автомобільний транспорт, Луцьк, екологічний вплив автотранспорту, акустичні характеристики, викиди оксидів карбону.

THE INFLUENCE OF QUARANTINE RESTRICTIONS DUE TO THE COVID-19 EPIDEMIC ON TRAFFIC INTENSITY AND ECOLOGICAL CONDITION IN LUTSK

V.V. Fedoniuk¹, V.V. Ivantsiv², M.A. Fedoniuk³

¹PhD, Associate Professor at the Department of Ecology and Agronomy,
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-1880-6710

²PhD, Head of the Department of Ecology and Agronomy,
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-4710-3245

³PhD, Associate Professor at the Department of Ecology and Agronomy,
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-4034-3695

Summary

Introduction. An urgent issue is the study of the environmental impact of road transport in cities and the development of ways to reduce such impact. Motor vehicles are the most powerful source of air pollution in the city. Cars also cause a number of negative types of physical impact on the environment (noise, vibration, electromagnetic pollution). In the context of the pandemic and national quarantine, it is now possible to assess the extent to which the negative factors of motor transport environmental impact are changing in the process of reducing the volume of traffic and car traffic. The **purpose** of this study was to conduct a comprehensive assessment of changes in the structure, dynamics, intensity of traffic in Lutsk and the environmental impact of these changes in the conditions of the introduced national quarantine in the spring of 2020. **Results.** Having carried out a set of measuring and computing works on five research sections of highways in Lutsk, we identified changes in the dynamics and structure of road traffic, as well as changes in the following indicators of road impact on ecosystems: 1) emissions of CO₂ compounds and carbon monoxide in total, or carbon oxides); 2) noise load on the section of the highway (standard acoustic characteristics and acoustic characteristics at any distance). It is established that the reduction of negative factors of environmental impact while reducing the intensity of traffic is nonlinear: When traffic is reduced by 2–3 times, carbon monoxide emissions are reduced by 60–70 %, the values of acoustic characteristics are reduced by only 10–15 %. **Conclusions.** Thus, there was a significant reduction in the pre-quarantine exceedances in the content of carbon oxides in the emissions of vehicles and the levels of noise pollution in Lutsk. Actual concentrations of carbon oxides in the areas adjacent to the highway decreased to the normative, acoustic characteristics in residential areas were lower than the norm

during the day. Thus, the introduction of quarantine restrictive measures in the country has significantly reduced the negative environmental impact of road transport systems on ecosystems, as the results obtained for Lutsk can be extrapolated to other cities and towns with similar configuration and congestion of transport systems.

Key words: road transport, Lutsk, environmental impact of motor transport, acoustic characteristics, emissions of carbon monoxide.

Вступ. Проблеми екологічної безпеки автомобільного транспорту в містах України та світу з кожним роком набувають дедалі більшої актуальності. Це пов'язано з тим, що частка автомобільного транспорту в забрудненні навколишнього природного середовища може становити в урбанізованих зонах до 80–90 %. Усвідомлення того впливу, який чинять автомобілі на стан навколишнього середовища, дає можливість зазначити, що важливо спрогнозувати й передбачити зміни інтенсивності, динаміки та розподілу в часі й просторі автотранспортного навантаження на міські екосистеми.

Епідемія коронавірусу та обмежувальні заходи, що були запроваджені у зв'язку з нею, несподівано дали змогу науковцям провести дослідження наслідків таких змін «у режимі реального часу». Під час періодів локдауну автотранспортний трафік у містах суттєво змінювався. Зміни відбувалися як в інтенсивності автотранспортного навантаження, так і в його просторовому та часовому розподілі. Саме дослідження таких змін упродовж весняного локдауну 2020 р. в м. Луцьку проведено в цій роботі.

Постановка проблеми. Об'єктом дослідження були особливості роботи автотранспортних мереж м. Луцька в умовах загальнонаціонального карантину 2020 р. Зміст дослідження полягав у проведенні порівняльної оцінки впливу автотранспорту на якісні й кількісні показники стану атмосферного повітря та загального стану екосистеми міста Луцька в умовах, коли інтенсивність його руху суттєво змінюється під час дії загальнодержавних карантинних обмежень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Екологічні наслідки автотранспортного впливу в м. Луцьку та їх прогресуюче зростання у XXI ст. було проаналізовано у працях С. Г. Панькевича, М. А. Федонюка, С. В. Турко, О. В. Іванців, В. В. Федонюк [3; 7; 8; 9]. Унаслідок цих досліджень було запропоновано створити недержавну альтернативну систему екологічного моніторингу стану атмосферного повітря в місті, адже кількість пунктів стаціонарного контролю за викидами на цей час дуже обмежена [8; 9].

Питання зміни інтенсивності, структури та просторово-часових особливостей руху автомобільного транспорту в містах в умовах обмежувальних протиепідемічних карантинних заходів – це новітня проблема, дослідження якої лише розпочалося. Проте низка авторів уже присвятили свої наукові праці її вивченню. Зокрема, у роботі М. М. Жука та І. І. Гіць розглядаються питання зміни підходів власників транспортних засобів і пасажирів до вибору шляху й засобу переміщення в умовах пандемії [3]; у праці О. Б. Гірної та О. Я. Кобилюх детально проаналізовано особливості та зміни транспортної логістики в карантинний період [1]. Статистичний аналіз таких змін можна провести завдяки матеріалам Є. Ю. Солонини [5], Державної служби статистики України [4].

Проте, звичайно, на цей час активні дослідження в зазначеній предметній області лише розпочалися, а наша стаття – перша спроба оцінити зміни для Луцька впродовж перших етапів карантинних обмежень у 2020 р.

Формулювання цілей статті. *Метою* дослідження стало проведення комплексної оцінки змін у структурі, динаміці, інтенсивності автотранспортного навантаження в м. Луцьку та екологічного впливу цих змін в умовах запровадженого загальнонаціонального карантину 2020 р. Відповідно, основними *завданнями* роботи було, по-перше, проведення комплексу спостережень за чисельністю та динамікою автомобільного транспорту в місті в період дії карантинних обмежень; по-друге, здійснення кореляційного аналізу чисельності й динаміки автотранспорту та показників екологічного навантаження; по-третє, розроблення рекомендацій щодо підвищення рівня екологічної безпеки автотранспортних мереж міста Луцька.

Вихідними матеріалами для виконання дослідження були дані власних спостережень, статистична інформація, дані інструментального контролю якісного складу атмосферного повітря стаціонарних постів спостережень у м. Луцьку, картографічні матеріали тощо.

Виклад основного матеріалу. Луцьк – це обласний центр та один із важливих багатофункціональних економічних, транспортних, туристичних, культурно-освітніх центрів Північно-Західної України. Міська територія має площу 4161 га, з яких 2,5 % – природні та штучні водотоки, 12,8 % – сільськогосподарські землі, 2,4 % – заболочені землі або ділянки без рослинного покриву. Населення Луцька налічує близько 220 тис. жителів. Місто обслуговує мережа доріг державного й місцевого значення, зокрема: міжнародна автотраса М-10 (Є-85), яка проходить обхідним півкільцем із півночі на південний схід; національна траса Н-22, що перетинає місто в широтному напрямку, у межах міста 9,2 км; національна автотраса Н-17, яка проходить із південного заходу, у межах міста 2,8 км; регіональна траса Р-14, що забезпечує сполучення маршрутом Луцьк – Ківерці – Дольськ.

Крім автомагістралей загальнодержавного значення, у Луцьку важливу роль відіграють дороги місцевого значення. Середні показники кількості автомобілів у Луцьку – 300 авто на 1000 мешканців, тобто за чисельності населення 220 тис. осіб кількість легкових автомобілів – близько 66 тис. одиниць, у тому числі легкового індивідуального транспорту – 59,4 тис. одиниць [3; 9].

Як відомо, транспортно-дорожній комплекс – це одне з найпотужніших джерел забруднення навколишнього середовища в місті. Робота двигунів автомобілів спричиняє викиди в атмосферне повітря великої кількості речовин-політантів. Транспорт є основним джерелом шумового, вібраційного та теплового забруднення на селітебних територіях.

У Луцьку, згідно з даними попередніх досліджень [9], у 2020 р. обсяг загальних викидів в атмосферу становив 1853,0 т від стаціонарних джерел та 171825,5 т від пересувних джерел (автотранспорту), тобто на порядок більше.

Навесні 2020 р. склалася унікальна ситуація: у зв'язку з епідемією коронавірусу світ завмер у карантині. В Україні загальнонаціональний карантин було запроваджено з 12 березня 2020 р., і практично в перші його дні обмеження стали дуже жорсткими. Це не могло не позначитися на роботі автомобільного транспорту.

Зупинилися практично всі перевезення, перестав працювати міський і міжміський автомобільний пасажирський транспорт, суттєво обмежився й рух приватних авто. Очевидно, що різкі зміни в динаміці та розподілі автотранспортних потоків мали би чинити певний вплив на екологічні процеси.

Упродовж березня – квітня 2020 р. було проведено цикл спостережень за динамікою транспортних потоків у п'яти контрольних точках на поживалених автомагістралях м. Луцька. Контрольні точки вибиралися на ділянках автомагістралей на таких вулицях, як Рівненська, Дубнівська, Ковельська, Володимирська, Львівська. Усі названі вулиці є виїздними трасами з міста в напрямках, відповідно, міст Рівного, Дубно, Ковеля, Володимира, Львова. Це найбільш інтенсивні за транспортним рухом автомагістралі обласного й міжобласного значення. Частина трас має міжнародне значення. На прилягаючих до зазначених вулиць ділянках екосистеми зазнають найбільшого автотранспортного впливу.

У таблицях 1–3 представлено результати проведених визначень інтенсивності та складу автотранспортних потоків на дослідних ділянках і вулицях міста Луцька. У таблиці 1, зокрема, представлені результати визначення інтенсивності руху автотранспорту в докарантинний період (дані весняного періоду 2019 р.). У таблицях 2 та 3 представлено результати спостережень на початку карантинного періоду (2-й тиждень карантину, 17 березня 2020 р.) та після завершення двох місяців карантину, коли обмеження почали послаблюватися (8-й тиждень карантину, 28 квітня 2020 р.). Спостереження за інтенсивністю руху здійснювалися в будні дні тижня (вівторок), у період ранкових годин (06.00–07.00), обідніх годин (13.00–14.00, година пік, період інтенсивного транспортного навантаження) та вечірніх годин (21.00–22.00, зменшення потоку автомобілів). Визначалася також середня добова інтенсивність автотрафіку.

Таблиця 1

Інтенсивність та структура транспортних потоків у Луцьку в період до запровадження карантину (за даними власних спостережень)

<i>Ділянка дороги</i>	<i>Інтенсивність транспортного потоку, авто/добу</i>	<i>Частка легкових авто, %</i>	<i>Частка мікроавтобусів, %</i>	<i>Частка вантажних авто, %</i>	<i>Частка автобусів, %</i>
Рівненська	16200	45	18	30	7
Дубнівська	7150	49	20	26	5
Ковельська	12450	41	23	29	7
Львівська	13400	42	18	36	4
Володимирська	9700	45	33	17	5

Як показує аналіз даних, представлених у таблицях 1–3, інтенсивність транспортного руху на основних магістралях Луцька дуже висока. До введення карантинних заходів протягом доби основними в'їздними вулицями міста проїжджало від 7 до 16 тис. авто. Проте після запровадження карантину інтенсивність руху транспорту послабилася вдвічі, а подекуди навіть утричі (2-й тиждень карантину). Однак після ослаблення карантинних заходів (8-й тиждень карантину) інтенсивність руху транспорту знову дещо зросла. На порядок скоротилася частка

автобусів у загальному автотранспортному потоці (від 5–10 % до 0,5–1 %). Проте частка мікроавтобусів зменшилася не так суттєво. Частка вантажних автомобілів зменшилася приблизно вдвічі.

Таблиця 2

**Інтенсивність та структура транспортних потоків у м. Луцьку
в період запровадження загальнонаціонального карантину
(2-й тиждень карантинних обмежень, 17 березня 2020 р.;
за даними власних спостережень)**

<i>Ділянка дороги</i>	<i>Інтенсивність транспортного потоку, авто/добу</i>	<i>Частка легкових авто, %</i>	<i>Частка мікроавтобусів, %</i>	<i>Частка вантажних авто, %</i>	<i>Частка автобусів, %</i>
Рівненська	5600	65	23	11	1
Дубнівська	3700	56	33	10	1
Ковельська	4300	55	32,5	12	0,5
Львівська	5200	60	26	13	1
Володимирська	4000	58	33,3	8	0,7

Таблиця 3

**Інтенсивність і структура транспортних потоків у м. Луцьку
в період запровадження загальнонаціонального карантину
(8-й тиждень карантинних обмежень, 28 квітня 2020 р.;
за даними власних спостережень)**

<i>Ділянка дороги</i>	<i>Інтенсивність транспортного потоку, авто/добу</i>	<i>Частка легкових авто, %</i>	<i>Частка мікроавтобусів, %</i>	<i>Частка вантажних авто, %</i>	<i>Частка автобусів, %</i>
Рівненська	7000	62	23,5	13	1,5
Дубнівська	4500	52	33	14	1
Ковельська	5500	51	35,4	13	0,6
Львівська	7200	58	26,8	14	1,2
Володимирська	5800	54	35	10	1

На основі отриманих результатів за допомогою методик, описаних у навчальному посібнику «Екологія автомобільного транспорту» [6], було визначено розрахунковим способом обсяги викидів в атмосферне повітря сполук CO_x (вуглекислий газ і чадний газ у сумі, або оксиди карбону), шумове навантаження на ділянці автотраси (стандартну акустичну характеристику та акустичну характеристику на довільній відстані). Зведені результати розрахунків викидів та впливу представлені в таблицях 4–6.

Як показує порівняльний аналіз даних таблиці 4, загальна сума викидів в атмосферне повітря сполук CO_x (оксиди карбону, вуглекислий газ і чадний газ, які, як відомо, є одними з основних парникових газів) до введення карантину коливалася на досліджених ділянках від 12,7 мг/м³ (вул. Дубнівська) до 20,9 мг/м³ (вул. Рівненська). Порівняння з нормативом (ГДКс.д. = 10,0 мг/м³) показує, що до карантину

відмічалось перевищення за цим показником у всіх п'яти точках спостереження. Найбільше перевищення вмісту сполук CO_x в автотранспортних викидах фіксувалося для ділянок на вул. Рівненській (на 100 %) та на вул. Львівській (на 80 %).

Таблиця 4

**Розраховані обсяги викидів
в атмосферне повітря сполук CO_x , мг/м₃**

<i>Ділянка дороги</i>	<i>Період до карантину</i>	<i>2-й тиждень карантину</i>	<i>8-й тиждень карантину</i>
Рівненська	20,9	13,4	13,6
Дубнівська	12,7	11,3	11,1
Ковельська	17,5	12,0	12,1
Львівська	18,4	13,0	13,8
Володимирська	15,0	11,7	12,4

Порівняння показників, отриманих у період 2-го тижня карантину (див. табл. 4), показало, що у зв'язку зі зниженням інтенсивності руху транспорту та зниженням частки вантажних автомобілів, а також практично повною відсутністю автобусів викиди оксидів карбону зменшилися та становили від 11,3 до 13,4 мг/м³. Крім зменшення, спостерігається також вирівнювання значення цього показника в усіх п'яти точках спостереження, відмінності незначні. Показник усе ще перевищує нормативний, проте не набагато (на 10–30 %, тоді як до карантину це перевищення могло бути більшим за 100 %). Найбільше перевищення було встановлене на вулицях Рівненській та Львівській.

У період 8-го тижня карантину (його послаблення) викиди сполук CO_x дещо зросли (на 0,2–0,8 мг/м³), проте не на всіх досліджених ділянках, наприклад, на вул. Дубнівській вони навіть зменшилися. Перевищення нормативного показника становило вже від 10 % до 40 %.

Таблиця 5

**Розрахована стандартна акустична характеристика
на узбіччі траси (V_7 , дБ)**

<i>Ділянка дороги</i>	<i>Період до карантину</i>	<i>2-й тиждень карантину</i>	<i>8-й тиждень карантину</i>
Рівненська	87,0	78,3	78,3
Дубнівська	83,5	76,0	77,1
Ковельська	85,9	75,9	77,3
Львівська	86,4	77,1	79,5
Володимирська	84,7	76,0	78,1

Порівняльний аналіз показників рівнів шумового забруднення (визначалася стандартна акустична характеристика V_7 – рівень шуму, у дБ), визначеного біля узбіччя автотраси (див. табл. 5), показав, що в докарантинний період рівень автотранспортного шуму на узбіччі основних автомагістралей м. Луцька перевищував допустимі значення для селітебної зони (норматив 55 дБ) на 28–32 дБ. Це досить високі значення перевищення.

У карантинний період показники стандартної акустичної характеристики зменшилися практично на всіх точках на 10 дБ на 2-й тиждень карантину та дещо зросли (на 1–2 дБ) на 8-й тиждень карантину. Отже, під час карантину акустичні характеристики також перевищували нормативи для селітебної зони (55 дБ), проте перевищення не було значним.

Таблиця 6

**Акустична характеристика
на довільній відстані від траси (V_n , дБ, $n = 100$ м)**

<i>Ділянка дороги</i>	<i>Період до карантину</i>	<i>2-й тиждень карантину</i>	<i>8-й тиждень карантину</i>
Рівненська	45,6	36,9	36,9
Дубнівська	42,1	34,6	35,7
Ковельська	44,5	34,5	35,9
Львівська	45,0	35,7	38,1
Володимирська	43,3	34,6	36,7

Для оцінки впливу автотранспортного шуму на біоту, екосистеми та на людину більш вагоме значення має акустична характеристика на довільній відстані від автотраси V_n (див. табл. 6), яка визначається для зони житлової забудови, місць, де гуляють жителі міста, паркових зон, скверів тощо. Для уніфікації одержаних результатів ми визначали значення V_n на відстані 100 м від контрольних точок біля дороги.

Як показує аналіз даних, представлених у таблиці 6, значення акустичної характеристики V_n , визначеної на відстані 100 м від автомагістралі, у докарантинний період коливалося в межах 42,1–45,6 дБ. Варто зазначити, що норматив для зони житлової забудови становить у денні години 45 дБ, у нічні – 35 дБ. Тобто в більшості точок він був дещо перевищеним або на межі перевищення.

Під час карантинних обмежень акустична характеристика на відстані 100 м зменшилася до показників 34,5–36,9 дБ, тобто навіть у денні години норматив для зони житлової забудови дотримувався на рівні денного (45 дБ), причому із запасом, і навіть на рівні нічного (35 дБ) у всіх точках.

Після послаблення карантинних обмежень ця акустична характеристика зросла, проте перебувала в межах нормативних значень.

На рисунках 1–7 представлені графіки та діаграми, які наочно демонструють виявлені закономірності між зниженням інтенсивності транспортного руху в Луцьку в період карантину та зменшенням забруднення атмосфери шкідливими газами й шумовими полями. Графічне представлення результатів показало, що за зменшення автотрафіку в місті у 2–3 рази негативні наслідки впливу автотранспорту послаблюються набагато повільніше (за оксидами вуглецю – на 60–70 %, за шумовим забрудненням – ще менше, лише на 10–15 %).

Тому необхідне планомірне запровадження сучасних технічних і містобудівних рішень для розв'язання проблем транспортного забруднення, а саме: популяризація електротранспорту, застосування шумозахисних технологій, вертикальне озеленення міста в комбінації з традиційним горизонтальним.

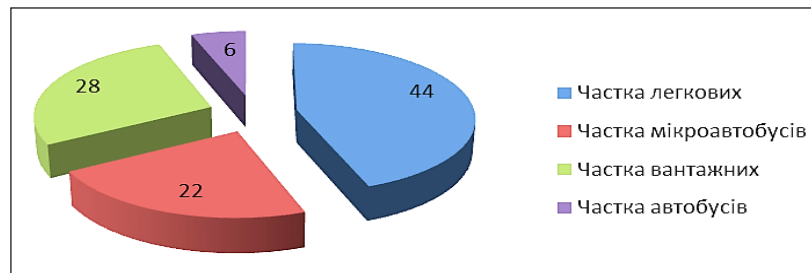


Рис. 1. Структура транспортного потоку (докарантинний період)

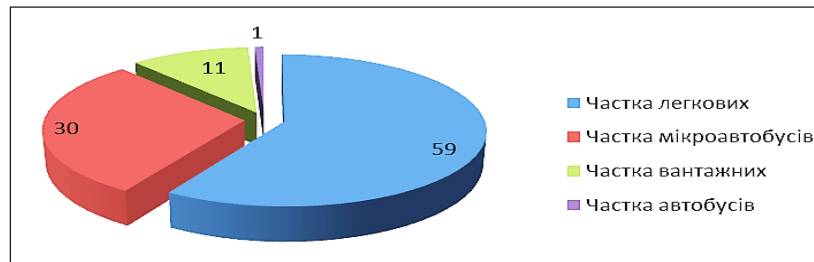


Рис. 2. Структура транспортного потоку (2-й тиждень карантину)

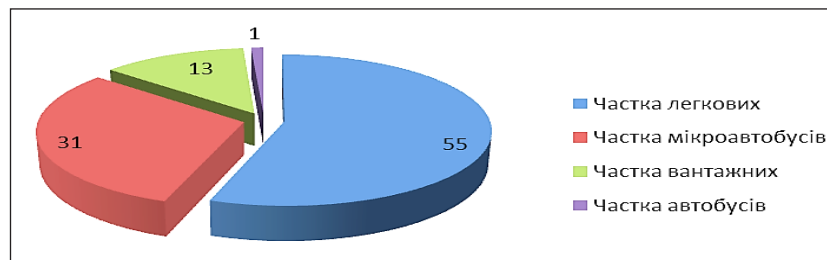


Рис. 3. Структура транспортного потоку (8-й тиждень карантину)

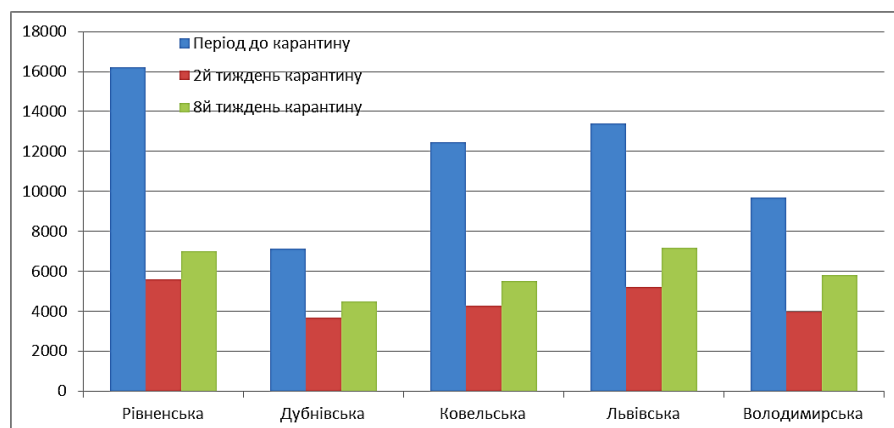


Рис. 4. Загальна динаміка автотрафіку (порівняння періодів)

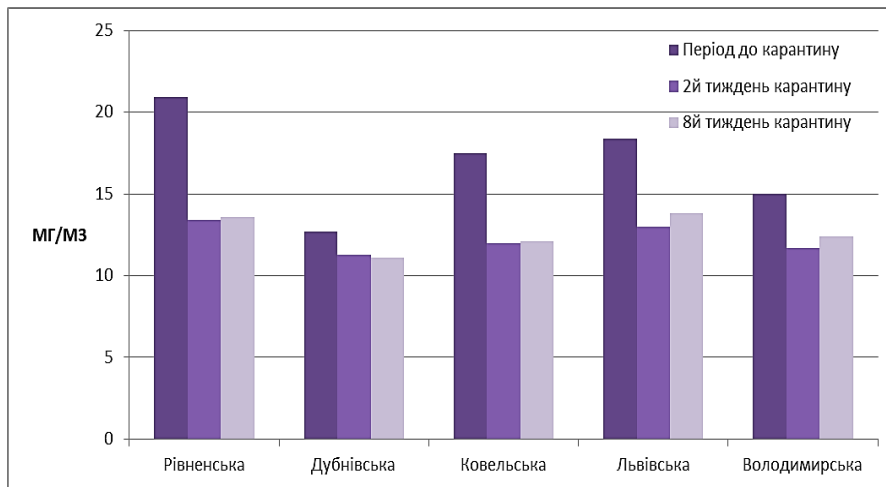


Рис. 5. Концентрація сполук CO_x (порівняння періодів)

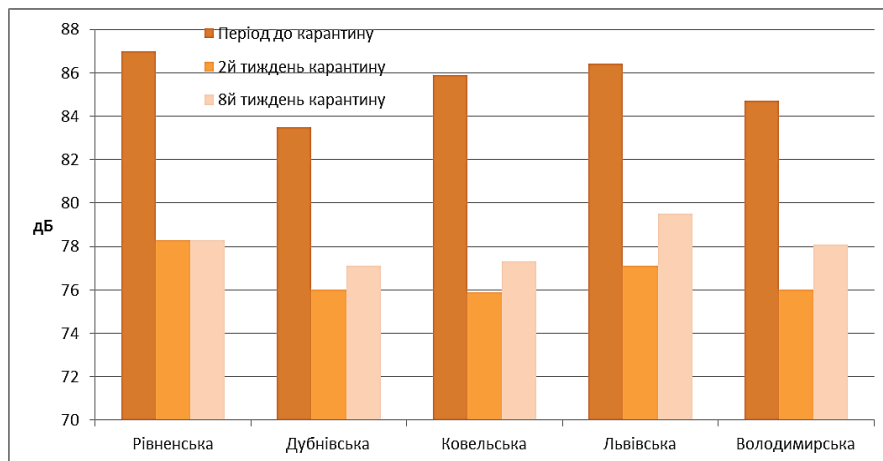


Рис. 6. Стандартна акустична характеристика на узбіччі траси (V₇, дБ), порівняння періодів

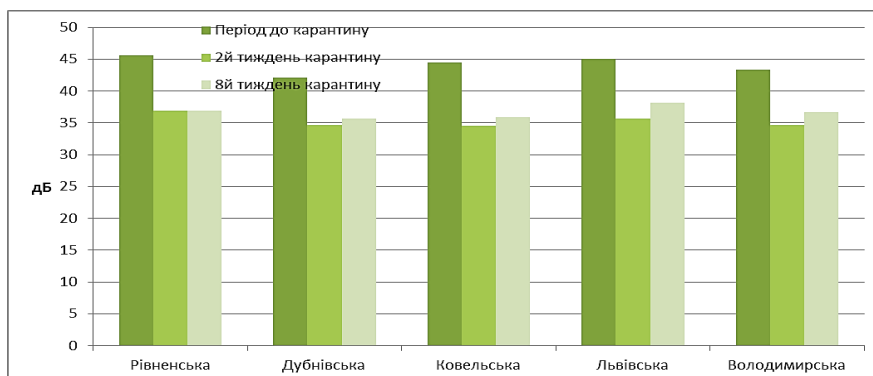


Рис. 7. Акустична характеристика на відстані 100 м від автотраси в житлових мікрорайонах (V_n, дБ), порівняння періодів

Висновки. Отже, проведене дослідження дає змогу констатувати, що найбільшого негативного екологічного впливу завдають три основні автомагістралі Луцька – виїзні шляхи до Рівного, Львова, Ковеля (вул. Львівська, Ковельська, Рівненська). Значним цей вплив є також на вул. Володимирській, Дубнівській, Ківерцівській, пр. Волі, пр. Відродження.

Сумарна інтенсивність транспортного руху на основних дорогах була в докарantinний період найбільшою на ділянках шосе, що ведуть на Рівне та Львів (до 16 000 авто/добу), найменше – на Дубно. Володимирська та Ковельська траси приблизно однакові за сумарним навантаженням.

Після запровадження загальнонаціонального карантину навесні 2020 р. інтенсивність автотранспортного руху в Луцьку знизилася майже у 2,5–3 рази, проте на останньому етапі карантину рух транспорту знову поживавився.

Суттєве зниження інтенсивності автотранспортного руху привело також до зниження викидів оксидів карбону в атмосферне повітря. Показники акустичних характеристик (рівень шуму) у зоні житлової забудови встановилися на рівнях, що є нижчими за нормативні.

Проте, як засвідчили розрахунки, у разі зменшення інтенсивності транспортного руху в місті у 2–3 рази послаблення негативних чинників впливу автотранспорту відбувається суттєво повільніше (за оксидами карбону – на 60–70 %, за шумовим забрудненням – ще менше, лише на 10–15 %).

Оскільки після послаблення карантинних заходів автотранспортне навантаження очікувано повернулося до докарantinного рівня, а економічні, соціальні й логістичні потреби м. Луцька потребують подальшого розвитку автотранспортного забезпечення, то оцінка зниження екологічного навантаження внаслідок локдауну не може бути однозначно позитивною.

Для підвищення рівня екологічної безпеки автотранспортних мереж рекомендуємо органам державної влади активно популяризувати альтернативні транспортні технології, насамперед електротранспорт, а також розглянути варіанти встановлення шумозахисних екранів у місті та додаткового горизонтального й вертикального озеленення придорожніх зон. Проєкт вертикального озеленення вулиць Луцька було розроблено окремо.

ЛІТЕРАТУРА

1. Жук М. М., Гіць І. І. Зміна вибору способу переміщення під впливом обмежень, пов'язаних з COVID-19. *Проблеми з транспортними потоками і напрямки їх розв'язання* : тези доповідей IV Всеукраїнської науково-теоретичної конференції, м. Львів, 25–26 березня 2021 р. Львів : ТзОВ «ГВС», 2021. С. 90–91.
2. Гірна О. Б., Кобилухо О. Я. Реалії та перспективи пандемії COVID-19 для транспортної логістики. *Молодий вчений*. 2020. № 7 (83). С. 208–214. URL: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-7-83-45> (дата звернення: 25.12.2021).
3. Панькевич С. Г., Федонюк М. А., Федонюк В. В. Оцінка надходження у довкілля продуктів зношення автомобільних шин (на прикладі Луцького району). *ЕКОГЕОФОРУМ – 2017. Актуальні проблеми та*

- інновації* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ, 22–25 березня 2017 р. Івано-Франківськ, 2017. С. 73–74.
4. Підсумки роботи транспорту у 2019 році / Державна служба статистики України. 2020. 20 січня. URL: <http://ukrstat.gov.ua/express/expr2020/01/04.pdf> (дата звернення: 25.12.2021).
 5. Солонина Є. Ю. Український транспорт і коронавірус: як впливає карантин на ключову галузь економіки України. *Радіо Свобода*. 2020. 20 березня. URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/30498066.html> (дата звернення: 15.01.2022).
 6. Екологія автомобільного транспорту : навчальний посібник / Ю. Ф. Гутаревич, Д. В. Зеркалов, А. Г. Говорун, А. О. Корпач, Л. П. Менжиєвська та ін. Київ : Основа, 2002. 312 с.
 7. Федонюк М. А., Федонюк В. В. Проблеми теплового забруднення селітебних територій: дослідження та моніторинг. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2017. № 1 (15). С. 231–239. URL: <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/5308> (дата звернення: 25.12.2021).
 8. Fedoniuk M. A., Fedoniuk V. V., Ivantsiv V. V. Possibilities for improvement of environmental monitoring of precipitation in the city (a case of Lutsk). *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2019. Вип. 50. С. 210–219.
 9. Федонюк В. В., Іванців О. В., Турко С. В. Студентський проект моніторингу екологічного стану повітря у м. Луцьку. *Екологія, природокористування та охорона навколишнього середовища: прикладні аспекти* : матеріали Всеукраїнської науково-практичної заочної конференції студентів, аспірантів та молодих учених, м. Маріуполь, 29 травня 2020 р. / за заг. ред. Г. О. Черніченка. Маріуполь : МДУ, 2020. С. 138–140.

REFERENCES

1. Zhuk, M. M., & Hits, I. I., (2021). Changing the choice of movement method due to COVID-19 restrictions [Zmina vyboru sposobu peremishchennia pid vplyvom obmezhen, poviazanykh z COVID-19]. *Problemy z transportnyu potokamy i napriamy yikh rozv'iazannia: tezy dopovidei IV Vseukrainskoi naukovo-teoretychnoi konferentsii – Problems with traffic flows and directions of their solution: abstracts of the IV All-Ukrainian scientific-theoretical conference* (Lviv, March 25–26, 2021). Lviv : TzOV “HVS”, pp. 90–91. [in Ukrainian]
2. Hirna, O. B., & Kobylukh, O. Ya. (2020). Realities and prospects of the COVID-19 pandemic for transport logistics [Realii ta perspektyvy pandemii COVID-19 dlia transportnoi lohistyky]. *Molodyi vchenyi – Young scientist*, no. 7 (83), pp. 208–214. Retrieved from: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-7-83-45> [in Ukrainian]

3. Pankevych, S. H., Fedoniuk, M. A., & Fedoniuk, V. V. (2017). Assessment of the entry into the environment of wear products of car tires (on the example of Lutsk district) [Otsinka nadkhodzhennia u dovkillia produktiv znoshennia avtomobilnykh shyn (na prykladi Lutskoho raionu)]. *EKOHEOFORUM – 2017. Aktualni probemy ta innovatsii: materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii – ECOGEOFORUM – 2017. Current issues and innovations: materials of the International Scientific and Practical Conference* (Ivano-Frankivsk, March 22–25, 2017). Ivano-Frankivsk, pp. 73–74. [in Ukrainian]
4. State Statistics Service of Ukraine (2020). Results of transport in 2019 [Pidsumky roboty transportu u 2019 rotsi]. Retrieved from: <http://ukrstat.gov.ua/express/expr2020/01/04.pdf> [in Ukrainian]
5. Solonyha Ye. Yu. (2020). Ukrainian transport and coronavirus: how quarantine affects a key sector of Ukraine's economy [Ukrainskyi transport i koronavirus: yak vplyvaie karantyn na kliuchovu haluz ekonomiky Ukrainy]. *Radio Svoboda – Radio Liberty*. Retrieved from: <https://www.radiosvoboda.org/a/30498066.html> [in Ukrainian]
6. Hutarevych, Yu. F., Zerkalov, D. V., Hovorun, A. H., Korpach, A. O., Menzhyievska, L. P. et al. (2002). Ecology of road transport: tutorial [Ekolohiia avtomobilnoho transportu: navchalnyi posibnyk]. Kyiv : Osnova. [in Ukrainian]
7. Fedoniuk, M. A., & Fedoniuk, V. V. (2017). Problems of thermal pollution of residential areas: research and monitoring [Problemy teplovoho zabrudnennia selitebnykh terytorii: doslidzhennia ta monitorynh]. *Ekolohichna bezpeka ta zbalansovane resursokorystuvannia – Environmental security and balanced resource use*, no. 1 (15), pp. 231–239. Retrieved from: <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/530> [in Ukrainian]
8. Fedoniuk, M. A., Fedoniuk, V. V., & Ivantsiv, V. V. (2019). Possibilities for improvement of environmental monitoring of precipitation in the city (a case of Lutsk). *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V. N. Karazina. Seriiia "Heolohiia. Heohrafiia. Ekolohiia" – Bulletin of Kharkiv National University named after VN Karazina. Series "Geology. Geography. Ecology"*, iss. 50, pp. 210–219. [in English]
9. Fedoniuk, V. V., Ivantsiv, O. V., & Turko, S. V. (2020). Student project of monitoring the ecological state of the air in Lutsk [Studentskyi proekt monitorynhu ekolohichnoho stanu povitria u m. Lutsku]. *Ekolohiia, pryrodokorystuvannia ta okhorona navkolyshnoho seredovyscha: prykladni aspekty: materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi zaochnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh uchenykh – Ecology, nature management and environmental protection: applied aspects: materials of the All-Ukrainian scientific-practical correspondence conference of students, graduate students and young scientists* (Mariupol, May 29, 2020) / ed. by H. O. Chernichenko. Mariupol : MDU, pp. 138–140. [in Ukrainian]

Наукове видання

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

Випуск 1(12), 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. 15,93.
Замов. № 0422/149. Наклад 200 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефон +38 (048) 709 38 69
+38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 6424 від 04.10.2018 р.

Scientific publication

TRANSPORT DEVELOPMENT

Scientific journal

Issue 1(12), 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 15,93.
Order No 0422/149. Edition of 200 copies.

Publishing House “Helvetica”
65101, Ukraine, Odessa, 6/1 Inglizi St.
Phone +38 (048) 709 38 69
+38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Certificate of publishing entity
ДК № 6424 as of 04.10.2018