

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

ВИПУСК 1(16), 2023

Заснований у жовтні 2016 року



Видавничий дім
«Гельветика»
2023

ОДЕСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ
НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 1(16)
2023

Заснований у жовтні 2016 року

Виходить 4 рази на рік

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

На підставі Наказу Міністерства освіти і науки України № 1188 від 24.09.2020 р.
(додаток 5) журнал внесений до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») у галузі економічних та технічних наук (051 – Економіка, 073 – Менеджмент, 133 – Галузеве машинобудування, 271 – 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. *Гасанов В.*, Азербайджанська державна морська академія, Азербайджан;
д.т.н., проф. *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 Славі 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 29 березня 2023 р.)

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

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

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

ISSN 2616-7360

© Одеський національний морський університет, 2023

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

ODESSA
NATIONAL MARITIME UNIVERSITY

TRANSPORT DEVELOPMENT

Scientific journal

ISSUE 1(16), 2023

Founded in October 2016



Publishing House
"Helvetica"
2023

ODESSA
NATIONAL MARITIME UNIVERSITY
TRANSPORT DEVELOPMENT
SCIENTIFIC JOURNAL

№ 1(16)
2023

Founded in October 2016

Frequency: four times a year

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

Pursuant to the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 1188
dated 24.09.2020 (Appendix 5), the journal is included in the List of scientific professional publications
of Ukraine (category “B”) in the field of economic and technical sciences
(051 – Economics, 073 – Management, 133 – Industry engineering,
271 – 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. <i>Varbanets R.A.</i> , ONMU;	<i>Maleki Vishkaei Behzad</i> , PhD, Luiss University, Italy;
DSc, Prof. <i>Dubrovskiy M.P.</i> , ONMU;	<i>Nam Kyu Park</i> , PhD, TongMyong University, South Korea;
DSc, Prof. <i>Yehupov K.V.</i> , ONMU;	<i>Ngoc An Minh</i> , PhD, Kochi University of Technology, Japan;
DSc, Prof. <i>Lapkina I.O.</i> , ONMU;	<i>Csiszar Csaba</i> , PhD, Budapest University of Technology and Economics, Hungary;
DSc, Prof. <i>Postan M.Ia.</i> , ONMU;	<i>Dashkovskiy S.</i> , DSc, Julius-Maximilians University of Wurzburg, Germany;
DSc, Prof. <i>Malaksiano M.O.</i> , ONMU;	<i>Duhovnik Joze</i> , DSc, University of Ljubljana, Slovenia;
DSc, Associate Prof. <i>Piterska V.M.</i> , ONMU;	<i>Kolmykova A.</i> , DSc, University of Bremen, Germany;
Doctor of Engineering, Prof. <i>Gasarov V.</i> , Azerbaijan State Marine Academy, Azerbaijan	<i>Klyus O.</i> , DSc, Maritime University of Szczecin, Poland;
DSc, Prof. <i>Kyrylova O.V.</i> , ONMU;	<i>Medvedev A.</i> , DSc, Transport and telecommunication institute, Latvia;
PhD in Engineering, Associate Professor <i>Sadigov V.</i> , Azerbaijan State Marine Academy, Azerbaijan;	<i>Mezitis Mareks</i> , DSc, Transport Academy, Latvia;
DSc, Prof. <i>L.S. Filina-Dawidowicz</i> , West Pomeranian University of Technology, Szczecin, Poland;	<i>Popova Je.</i> , DSc, Transport and telecommunication institute, Latvia.
<i>Aymelek Murat</i> , PhD, Izmir Katip Celebi University, Turkey;	
<i>Lyubomirov Slavi Yasenov</i> , PhD, University of Plovdiv Paisii Hilendarsk, Bulgaria;	

Recommended for printing by the Academic Council of Odessa National Maritime University
(Minutes No 9 dated March 29, 2023)

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

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

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

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

З М І С Т

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

- М.В. Босий, О.А. Боса, Є.В. Бельченков, О.А. Шевченко**
Оцінка термодинамічної ефективності геотермального теплового насоса для теплопостачання підприємств морського транспорту.....9
- D.V. Lavinsky, G.O. Anischenko, V.I. Konokhov**
Features of deforming of composite inductors during electromagnetic processing of materials.....25

РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

- М.О. Бойко, В.П. Савчук, Д.О. Зінченко**
Визначення впливу порушення протікання робочого процесу суднового двигуна MAN B&W 8148/60 на динамічні показники кривошипно-шатунного механізму.....34
- А.І. Головань, І.В. Грицук**
Основні принципи дослідження ефективності технічного обслуговування судна.....47
- І.П. Гончарук, А.І. Головань, А.Ю. Піменова**
Підвищення безпеки маневрування при шлюзуванні судна.....61
- І.П. Гончарук, А.І. Головань, О.М. Шумило, О.В. Шамов**
Особливості управління безпекою маневрування при виконанні швартових операцій до борту судна.....69
- В.І. Чимшир**
Концептуальні засади підвищення безпеки та надійності автономних технічних систем на прикладі судна.....79
- А.О. Яківчук, О.В. Логінов, Л.В. Логінова, С.В. Козловський**
Особливості правового регулювання охорони праці з урахуванням факторів, які впливають на екіпаж судна в системі забезпечення безпеки судноплавства.....89
- С.О. Яремчук, І.З. Маслов**
Моделювання динаміки зміни режиму течії рідини в судновому трубопроводі при підготовці морських інженерів.....100

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

- І.С. Афтаназів, І.Г. Свідрак, О.О. Бойко, О.І. Строган**
Кінематичне проектування як засіб вдосконалення пошуку скупчень риби.....115
- G.O. Weigang, K.V. Komar**
The practical aspects of reducing the level of accidents on city roads by forming a safety profile.....137

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ
№ 1(16), 2023

Є.М. Лебідь, Н.О. Лужанська, І.Г. Лебідь Розробка проєктів альтернативних способів доставки зовнішньоторговельних вантажів у період воєнного часу за участю логістичних посередників.....	149
О.М. Melnyk, O.V. Shcherbina, Iu.V. Mykhailova, T.S. Obnyavko, T.O. Korobko Focused research on technological innovations in shipping industry: review and prospects.....	164
О.В. Рябушенко, І.С. Наглюк Вплив швидкісного режиму на показники ефективності дорожнього руху.....	175
Н.В. Судник, М.С. Вільшанюк Формування фрахтової ставки на основі обмежених обсягів вихідних даних.....	187

МЕНЕДЖМЕНТ

Ю.В. Бичковський Основні положення проектно-орієнтованого управління в судноплаванні як основи для забезпечення безпеки	197
--	------------

C O N T E N T S

INDUSTRIAL MECHANICAL ENGINEERING

- M.V. Bosyi, O.A. Bosa, E.V. Belchenkov, O.A. Shevchenko**
Assessment of the thermodynamic efficiency of the geothermal
heat pump for heat supply of sea transport enterprises.....9
- D.V. Lavinsky, G.O. Anischenko, V.I. Konokhov**
Features of deforming of composite inductors during electromagnetic
processing of materials.....25

RIVER AND SEA TRANSPORT

- M.O. Boyko, V.P. Savchuk, D.O. Zinchenko**
Determination of a MAN B&W 8148/60 marine engine workflow
disruption influence on the dynamic indicators of the crank mechanism.....34
- A.I. Golovan, I.V. Gritsuk**
The main principles of assessing the efficiency of ship maintenance.....47
- I.P. Honcharuk, A.I. Golovan, A.Y. Pimenova**
Improving the safety of maneuvering during ship locking.....61
- I.P. Honcharuk, A.I. Golovan, O.M. Shumylo, O.V. Shamov**
Features of maneuvering safety management during ship-to-ship docking.....69
- V.I. Chymshyr**
Conceptual principles of improving the safety and reliability
of autonomous technical systems using a ship as an example.....79
- A.O. Yakivchuk, O.V. Lohinov, L.V. Lohinova, S.V. Kozlovskiy**
Features of the legal regulation of labor protection, taking into account
the factors that affect the ship's crew in the system of security and safety
in shipping.....89
- S.O. Yaremchuk, I.Z. Maslov**
The modelling of dynamics of fluid flow regime change
in the ship pipeline during the training of marine engineers.....100

TRANSPORT TECHNOLOGIES (BY TYPE)

- I.S. Aftanaziv, I. H. Svidrak, O.O Boiko, O.I. Strohan**
Kinematic design as a means of improving the search for fish aggregations115
- G.O. Weigang, K.V. Komar**
The practical aspects of reducing the level of accidents on city roads
by forming a safety profile.....137

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ
№ 1(16), 2023

Ie.M. Lebid, N.O. Luzhanska, I.H. Lebid Development of alternative international shipment projects involving logistics intermediaries in wartime.....	149
O.M. Melnyk, O.V. Shcherbina, Iu.V. Mykhailova, T.S. Obnyavko, T.O. Korobko Focused research on technological innovations in shipping industry: review and prospects.....	164
O.V. Ryabushenko, I.S. Nahliuk Influence of speed mode on traffic efficiency indicators.....	175
N.V. Sudnyk, M.S. Vilshaniuk Formation of freight rate based on limited volumes of output data.....	187

MANAGEMENT

Y.V. Bychkovsky Project-oriented management in shipping as a basis for ensuring safety	197
--	------------

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.577:658

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.01>

ОЦІНКА ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА ДЛЯ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

М.В. Босий¹, О.А. Боса², Є.В. Бельченков³, О.А. Шевченко⁴

¹викладач кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва,
Центральноукраїнський національний технічний університет,
Кропивницький, Україна
ORCID ID: 0000-0002-3090-0427

²лаборант кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва,
Центральноукраїнський національний технічний університет,
Кропивницький, Україна
ORCID ID: 0000-0001-7621-6631

³студент кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва,
Центральноукраїнський національний технічний університет,
Кропивницький, Україна
ORCID ID: 0009-0009-3463-4179

⁴студент кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва,
Центральноукраїнський національний технічний університет,
Кропивницький, Україна
ORCID ID: 0009-0006-8929-7665

Анотація

Вступ. У статті розглядається проблема використання геотермальних теплових насосів (ГТН), що працюють на альтернативних джерелах енергії для теплопостачання підприємств морського транспорту. Для теплопостачання підприємств морського транспорту використовують ГТН з низькопотенційною теплою джерел, повітря, водою і надр землі. **Метою** роботи є оцінка термодинамічної ефективності ГТН при використанні їх на підприємствах морського транспорту та морських портах. **Результати.** Виконано термодинамічний аналіз ефективності та характеристик ГТН, що працюють з різними джерелами низькопотенційної теплоти. Визначено фактори, які впливають на енергетичну ефективність ГТН, оцінені особливості роботи ґрунтових, водяних та повітряних ГТН для південних кліматичних умов України. Проаналізовано вплив тривалості температур повітря різних величин на теплопродуктивність ГТН. Для підвищення ефективності роботи теплонасосної системи запропоновано схему вилучення низькопотенційної теплоти з використанням ґрунтового ТН і повітряного теплообмінника. На підставі проведених досліджень встановлено, що перевагою повітря як теплоносія є те, що повітряні ГТН можуть працювати практично повсюди. Новітнім способом підвищення ефективності ГТН є комбіноване

використання низькопотенційної теплоти ґрунту і повітря та забезпечує високу теплопродуктивність ГТН протягом всього року і має більш високий показник енергетичної ефективності у порівнянні з традиційними системами теплопостачання. ГТН мають значну перевагу перед іншими теплоенергетичними системами та установками. Вони споживають енергію поновлюваних джерел при зниженні витрат на електропостачання більш, ніж в половину. **Висновки.** Використання ГТН для утилізації низькопотенційних теплових потоків економічно вигідно. Термодинамічний аналіз ефективності ГТН для систем теплопостачання показує, що в сучасних економічних умовах тенденція систем теплопостачання може розвиватися в наступних напрямках: застосування парокompресійних ТН, використання вторинних енергоресурсів промислових підприємств морського транспорту. Застосування даних заходів може суттєво підвищити економічні і теплотехнічні характеристики теплопостачального обладнання для будівель підприємств морського транспорту.

Ключові слова: геотермальний тепловий насос, термодинамічний цикл, тепла енергія, низькопотенційне джерело теплоти, системи теплопостачання, коефіцієнт трансформації, термодинамічна ефективність.

ASSESSMENT OF THE THERMODYNAMIC EFFICIENCY OF THE GEOTHERMAL HEAT PUMP FOR HEAT SUPPLY OF SEA TRANSPORT ENTERPRISES

M.V. Bosyi¹, O.A. Bosa², E.V. Belchenkov³, O.A. Shevchenko⁴

¹Lecturer at the Department of Materials Science and Foundry
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-3090-0427

²Laboratory Assistant of the Department of Materials Science and Foundry
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID ID: 0000-0001-7621-6631

³Student of the Department of Materials Science and Foundry
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID ID: 0009-0009-3463-4179

⁴Student of the Department of Materials Science and Foundry
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID ID: 0009-0006-8929-7665

Summary

Introduction. The article examines the problem of using geothermal heat pumps (HTN) operating on alternative energy sources for heat supply of maritime transport enterprises. For heat supply, sea transport enterprises use heat pumps with low-potential heat from sources, air, reservoirs, and the subsoil of the earth. **The purpose of the work** is to evaluate the thermodynamic efficiency of HTNs when using them at sea transport enterprises and sea ports. **The results.** A thermodynamic analysis of the efficiency and characteristics of heat pumps operating with various sources of low-potential heat was performed. The factors affecting the energy efficiency of the HTN were determined, the peculiarities of the operation of soil, water and air HTN for the southern climatic conditions of Ukraine were evaluated. The influence of the duration of air temperatures of different values on the thermal productivity of the HTN was analyzed. In order to increase

*the efficiency of the heat pump system, a scheme for extracting low-potential heat with the use of soil TN and an air heat exchanger is proposed. Based on the conducted research, it was established that the advantage of air as a heat carrier is that air heating systems can work almost everywhere. The newest method of increasing the efficiency of the heating system is the combined use of low-potential heat of the soil and air, which ensures high thermal productivity of the heating system throughout the year and has a higher energy efficiency index compared to traditional heat supply systems. HTNs have a significant advantage over other thermal energy systems and installations. They consume energy from renewable sources while reducing electricity supply costs by more than half. **Conclusions.** The use of heat exchangers for the disposal of low-potential heat flows is economically beneficial. Thermodynamic analysis of the efficiency of heat supply systems for heat supply systems shows that in modern economic conditions, the trend of heat supply systems can develop in the following directions: the use of steam compression heat pumps, the use of secondary energy resources of industrial enterprises of sea transport. The application of these measures can significantly improve the economic and heat-technical characteristics of heat supply equipment for buildings of maritime transport enterprises.*

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

Вступ. Нині одним із ефективних і енергозберігаючих способів, що дає можливість економити паливно-енергетичні ресурси, знижувати забруднення навколишнього середовища, задовольняти потреби споживачів у технологічній теплоті є застосування теплонасосних технологій виробництва теплоти як в Україні, так і у світі в цілому. Необхідно на сучасному етапі використовувати та впроваджувати сучасні теплонасосні технології з використанням відновлювальних альтернативних природних джерел енергії, які дають можливість для енергозбереження і зменшення викидів парникових газів в довкілля [1–10].

Натепер сучасним екологічним та ефективним джерелом енергії для теплонасосних технологій системи теплопостачання є використання енергії землі, що міститься у повітрі, ґрунті та воді. Тому необхідно розвивати енергоефективні екологічно чисті ГТН технології для систем теплопостачання типу «повітря–вода», «ґрунт–вода» і «вода–вода», що працюють з високими показниками ефективності і за опалювальний період заощаджують до 75% коштів у порівнянні із традиційними системами опалення [10–16].

Постановка проблеми. Застосування для теплопостачання традиційних джерел енергії потребує суттєвих фінансових затрат із скороченням запасів органічних видів палива та зростанням цін на енергоносії. Натепер на даному етапі необхідно впроваджувати сучасні ГТН з використанням поновлюваних альтернативних джерел енергії, які відкривають можливість до енергозбереження і зменшення викидів парникових газів в довкілля. Проблема зниження затрат на теплопостачання актуальна нині і для підприємств морського транспорту [13–16].

Підвищення енергоефективності ГТН, які використовують геотермальну теплоту, в наш час є одним із найважливіших питань для подальшого розвитку та впровадження технологій застосування відновлювальних джерел

енергії в системах теплопостачання і також для підприємств морського транспорту [14–16].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. ГТН є одним з перспективних напрямків розвитку сучасної енергетики і знаходиться в центрі уваги зарубіжних і українських дослідників. В країнах Європи та Америки ГТН використовуються вже більше ніж 30 років для теплопостачання житлових і інших будівель та приміщень. Досвід таких країн, як США, Японія, Франція, Німеччина, Швеція, Фінляндія та інших доводить доцільність застосування ГТН [14–16].

ГТН – найбільш ефективне джерело альтернативної енергії, які працюють за принципом зворотнього циклу холодильної машини, передаючи тепло від низькотемпературного джерела до середовища з більш високою температурою, наприклад, системи опалення і гарячого водопостачання. Тепловий насос працює наступним чином. У теплообміннику-випарнику відбирається теплота низького потенціалу і передається так званому робочому тілу (холодоагенту). Утворені у випарнику пари холодоагента стискаються в компресорі і одночасно підвищуються їх тиск і температура. Потім теплота стиснутої пари у конденсаторі передається тепловому споживачу, а конденсат після дроселювання тиску знову надходить у випарник. Нині компресійні ГТН отримали найбільше використання для теплопостачання [14–17].

Проведення термодинамічного дослідження енергоефективності використання ГТН в системах теплопостачання на підприємствах морського транспорту та морських портах натеper є актуальним.

Методологією термодинамічного дослідження енергоефективності і впровадження ТН в системах теплопостачання на підприємствах морського транспорту та морських портах при використанні низькопотенційних джерел теплоти, наприклад, ґрунту, ґрунтових вод, повітря є застосування ексергетичного методу дослідження з визначенням коефіцієнта трансформації ГТН (COP) та ексергетичного ККД [15–21].

Формулювання цілей статті. Метою статті є оцінка термодинамічної ефективності ГТН при використанні їх на підприємствах морського транспорту та морських портах.

Виклад основного матеріалу. ГТН поділяють на: геотермальні ґрунтові «ґрунт-вода», водяні «вода-вода» та повітряні «повітря-вода», а також ГТН які використовують вторинну теплоту.

В ГТН з горизонтальним контуром система «ґрунт-вода» колектор розміщується кільцями або спіралями в горизонтальних траншеях нижче глибини промерзання ґрунту (зазвичай від 1,5 м і більше) з розрахунку: один метр труби еквівалентний 20–30 Вт. Цей спосіб є найбільш економічно ефективним для підприємств морського транспорту за умови відсутності дефіциту земельної площі під контур [18, 19].

В ГТН з вертикальним контуром система «ґрунт-вода» колектор розміщується спіралями або кільцями у водоймі (морі, озері, ставку, річці) нижче глибини промерзання. Цей варіант є ідеальним за всіма показниками: короткий контур, найбільш висока температура навколишнього середовища, як наслідок, висока ефективність роботи. Один метр труби підводного контуру дорівнює 30 Вт теплової

енергії. Труби заповнюються антифризом (розчин пропілен-гліколю). Це найбільш дешевий варіант, але є вимоги до мінімальної глибини і обсягу води у водоймі для конкретного регіону підприємств морського транспорту.

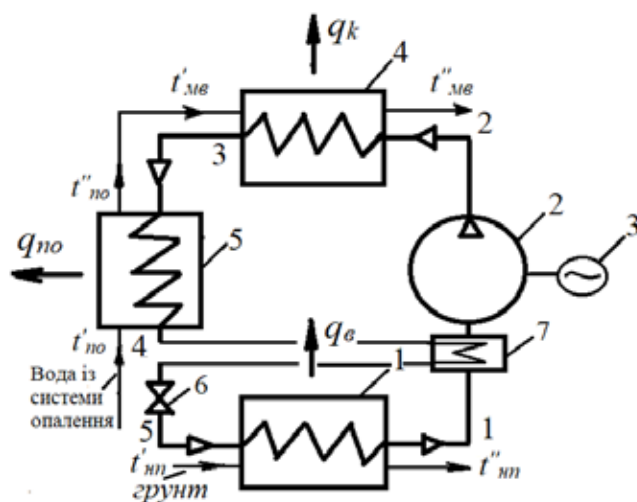
В ГТН з притопленим контуром система «вода-вода» ґрунтові води є кращим джерелом енергії, завдяки тому, що навіть в зимовий час температура цього ресурсу має додатні значення від +5 до +15 °С. ГТН, які отримують енергію від ґрунтових вод мають найбільш високий ККД [21].

Повітряні ГТН використовують як джерело низькопотенційної теплової енергії повітря. Джерелом теплоти є зовнішнє (атмосферне) повітря і витяжне вентиляційне повітря (загальнообмінної або місцевої) вентиляції будівель підприємств морського транспорту.

Повітряні ГТН не вимагають монтажу підземного чи підводного контуру – їх використовують в тому випадку, коли інші варіанти відбору теплоти не можуть бути реалізовані. Теплова енергія повітря використовується до позначки -15 °С. При сильних морозах застосовують додатковий теплогенератор, але ТН Heloitem мають робочий діапазон температур від -25 до +45 °С і додатковий теплогенератор не потрібний [22]. Існують також повітряні ТН, які відбирають низькопотенційну теплоту з повітря і використовують його для обігріву приміщень в будинку за допомогою повітряної каналної системи «повітря-повітря» [23].

Принципова схема ґрунтового геотермального парокомпресійного теплового насоса наведена на рис. 1.

Температурні рівні низькопотенційних джерел теплоти. Зовнішнє повітря +5...+10 °С, витяжна вентиляція +15...+25 °С, озерна вода 0...+10 °С, річкова вода 0...+10 °С, морська вода +3...+8 °С, ґрунт 0...+10 °С, ґрунтові води >10 °С, геотермальна вода +20...+50 °С [18].



1 – випарник; 2 – компресор; 3 – електродвигун;

4 – конденсатор; 5 – охолоджувач; 6 – дросель; 7 – перегрівач

Рис. 1. Принципова схема геотермального парокомпресійного теплового насоса «ґрунт–вода» для системи теплостачання

Теплові навантаження в ГТН «грунт–вода» представлені на p – h діаграмі (рис. 2), де вони наведені у вигляді відповідних відрізків прямих ліній, що відображають основні термодинамічні процеси. Енергетичну ефективність ГТН «грунт–вода» оцінюємо за допомогою p – h діаграми (рис. 2).

Термодинамічний розрахунок циклу ГТН «грунт–вода» наступний [15–23].

Температура насиченої пари пропану на виході з випарника

$$T_B = T''_{нт} - \Delta T_B. \quad (1)$$

Температура конденсації пропану в конденсаторі

$$T_K = T''_{мв} + \Delta T_K. \quad (2)$$

Ступінь стиснення робочого тіла пропану в компресорі

$$\varepsilon = P_K/P_B, \quad (3)$$

де $P_K = 2,5$ МПа, $P_B = 0,45$ МПа – тиск конденсації і випаровування пропану при температурах $T_K = 342$ К і $T_B = 275$ К.

Питома робота стиснення в компресорі

$$l_{ст} = h_2 - h_1. \quad (4)$$

Питоме теплове навантаження випарника

$$q_B = h_1 - h_5. \quad (5)$$

Питома теплова потужність конденсатора

$$q_K = h_2 - h_3. \quad (6)$$

Питоме теплове навантаження охолоджувача

$$q_{ii} = h_3 - h_4. \quad (7)$$

Правильність розрахунку визначається перевіркою теплового балансу

$$l_{ст} + q_B = q_K + q_{по}. \quad (8)$$

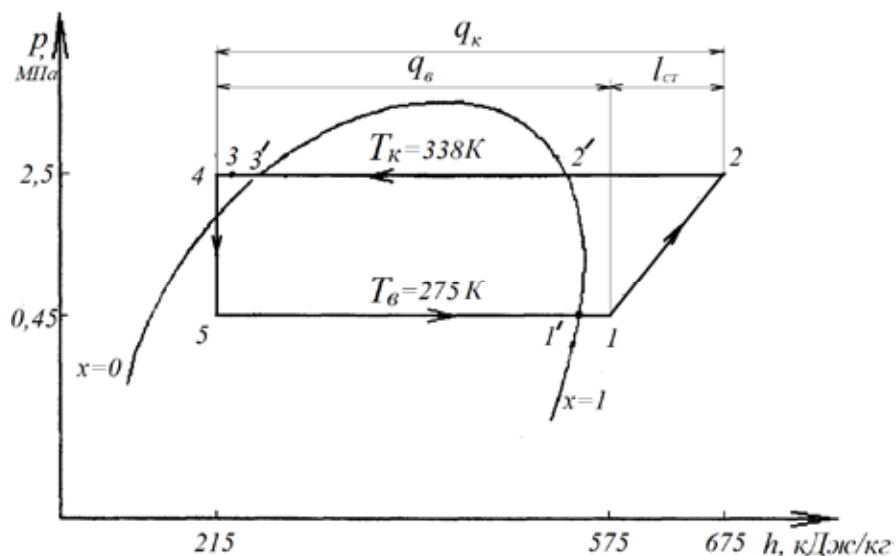


Рис. 2. Цикл ТН «грунт–вода» в p – h діаграмі

Питома витрата первинної енергії (електроенергії) ГТН на одиницю виробленої теплоти

$$E_{ТН} = l_{CT} / q_K \quad (9)$$

Питома енергія, яка споживається електродвигуном

$$W = l_{CT} / \eta_{ем.} \cdot \eta_e \quad (10)$$

де $\eta_{ем.} = 0,95$ – електромеханічний ККД компресора, $\eta_e = 0,8$ – ККД електродвигуна.

Теоретичний коефіцієнт трансформації теплоти ідеального циклу Карно COP_T

$$COP_T = T_K / T_K - T_B \quad (11)$$

де T_B – абсолютна температура випаровування пропану у випарнику ТН, К; T_K – абсолютна температура конденсації пропану в конденсаторі ТН, К.

Коефіцієнт трансформації теплоти ГТН

$$COP = COP_T \cdot \eta_{ТН} \quad (12)$$

де $\eta_{ТН}$ – коефіцієнт, який враховує реальні процеси, що здійснюються робочим тілом у ТН, який згідно з рядом джерел теплоти змінюється в діапазоні 0,6...0,8 (приймаємо $\eta_{ТН} = 0,6$) [15]; COP_T – теоретичний коефіцієнт трансформації ТН.

Ексергетичний розрахунок ТН «грунт–вода» виконаний на основі визначення ексергій при роботі ТН «грунт–вода» та ексергетичного балансу підведеної і відведеної ексергії в кожному елементі обладнання ТН «грунт–вода» [24–27].

Ексергетичний ККД ТН «грунт–вода» показує ступінь термодинамічної досконалості ТН і розраховується як відношення відведеної від ТН ексергії до підведеної ексергії [24–27]

$$\eta_{ex} = e_{від.} / e_{під.} \quad (13)$$

де $e_{від.} = e_B + e_{по}$ – сума відведеної від ТН ексергії; $e_{під.} = e_H + e_e$ – сума підведеної до ТН ексергії; e_B – питома ексергія, відведена середовищем, яке нагрівається від конденсатора ТН; $e_{по}$ – питома ексергія, відведена середовищем, яке нагрівається від охолоджувача; e_H – питома ексергія, підведена до випарника низькопотенційного джерела теплоти; e_e – питома ексергія електричної енергії, підведеної до компресора на його привід.

Ексергія отримана високопотенційним джерелом у конденсаторі

$$e_B = \tau_B q_K \quad (14)$$

де τ_B – ексергетична температура високопотенційного теплоносія

$$\tau_B = \frac{T_{ср.МВ}^K - (t_{н.с.} + 273)}{T_{ср.МВ}^K} \quad (15)$$

Середня логарифмічна температура гарячого теплоносія

$$T_{ср.МВ}^K = \frac{t_{МВ}'' - t_{МВ}'}{\ln \frac{t_{МВ}'' + 273}{t_{МВ}' - 273}} \quad (16)$$

Ексергія отримана високопотенційним теплоносієм в охолоджувачі

$$e_{по} = \tau_{по} q_{по} \quad (17)$$

де τ_B – ексергетична температура високопотенційного теплоносія в охолоджувачі

$$\tau_{no} = \frac{T_{cp}^{no} - (t_{н.с.} + 273)}{T_{cp}^{no}}. \quad (18)$$

Середня логарифмічна температура високопотенційного теплоносія в охолоджувачі

$$T_{cp}^{no} = \frac{t_{no}'' - t_{no}'}{\ln \frac{t_{no}'' + 273}{t_{no}' - 273}}. \quad (19)$$

Ексергія, віддана низькопотенційним теплоносієм у випарнику

$$e_n = \tau_n q_v, \quad (20)$$

де τ_n – ексергетична температура низькопотенційного теплоносія

$$\tau_n = \frac{T_{cp.нт.}^B - (t_{н.с.} + 273)}{T_{cp.нт.}^B}, \quad (21)$$

де $\tau_{н.с.}$ – температура навколишнього середовища

Середня логарифмічна температура низькопотенційного теплоносія

$$T_{cp.нт.}^B = \frac{t_{нт.}' - t_{нт.}''}{\ln \frac{t_{нт.}' + 273}{t_{нт.}'' - 273}}. \quad (22)$$

Ексергія електроенергії, що витрачається на привід компресора

$$e_c = W = \frac{l_{ст.}}{\eta_{с.м.} \eta_c}. \quad (23)$$

Результати проведеного вище термодинамічного розрахунку циклу ГТН «грунт–вода» наведені в табл. 1.

Наведений вище термодинамічний аналіз енергетичних і ексергетичних втрат дає тільки загальне уявлення про термодинамічну ефективність циклу ГТН

Таблиця 1

Термодинамічний розрахунок циклу ГТН «грунт–вода»

Параметр	Розмірність	Розрахункові значення
1	2	3
Температура випаровування пропану, T_B	К	275
Ентальпія пропану після випарника, h_1	кДж/кг	580
Тиск пропану у випарнику, P_B	МПа	0,45
Температура конденсації пропану, T_K	К	342
Ентальпія пропану після конденсатора, h_3	кДж/кг	225
Тиск конденсації пропану, P_K	МПа	2,5
Ентальпія пропану на вході в компресор, h_1	кДж/кг	575
Ентальпія пропану після компресора, h_2	кДж/кг	675
Ентальпія пропану перед випарником, h_5	кДж/кг	215

Продовження табл. 1

1	2	3
Питоме теплове навантаження випарника, q_v	кДж/кг	360
Питоме теплове навантаження конденсатора, q_k	кДж/к	450
Питоме теплове навантаження охолоджувача, $q_{по}$	кДж/кг	10
Питома робота стиснення в компресорі, $l_{ст}$	кДж/кг	100
Питома енергія, яка споживається електродвигуном, W	кДж/кг	131
Перевірка теплового балансу, $q_{тп}$	–	460
Коефіцієнт стиснення, ε	–	5,5
Коефіцієнт перетворення теплоти ТН, COP COP	–	5,1 3,5
Середня температура низькопотенційного теплоносія, $T_{ср.нт}^e$	К	279
Термодинамічна температура низькопотенційного теплоносія,	–	0,062
Ексергія, віддана низькопотенційним теплоносієм, e_n	кДж/кг	22,3
Середня температура високопотенційного теплоносія в конденсаторі, $T_{ср.мв.}^k$	К	338
Термодинамічна температура високопотенційного теплоносія в конденсаторі, τ_v	–	0,155
Ексергія, одержана високопотенційним теплоносієм в конденсаторі, e_v	кДж/кг	69,75
Середня температура високопотенційного теплоносія в охолоджувачі, $T_{ср}^{no}$	К	303
Термодинамічна температура високопотенційного теплоносія в охолоджувачі, t	–	0,099
Ексергія, одержана високопотенційним теплоносієм в охолоджувачі, $e_{по}$	кДж/кг	0,99
Ексергія електроенергії, яка споживається, e_e	кДж/кг	131
Ексергетичний ККД ТН, η_{ex}	–	0,45

«грунт-вода», на підставі якого можна зробити висновок про внесок того, чи іншого елемента ГТН «грунт-вода» в ефективність перетворення потоків енергії.

Для прийняття практичних рішень щодо зменшення ексергетичних втрат в елементах ГТН «грунт-вода» необхідно мати інформацію про власні і технічні втрати ексергії в кожному з елементів.

Тому, необхідно продовжити дослідження в цьому напрямку, прийнявши за основу розглянутий вище приклад для ГТН «грунт-вода», який працює на холодильному агенті пропану і в подальшому використовувати найсучасніші природні екологічно чисті робочі тіла для теплового насоса і відновлювальні джерела енергії для трансформації теплової енергії.

Висновки. Впровадження ГТН є перспективним напрямком використання альтернативних джерел енергії для забезпечення потреб систем теплопостачання, вентиляції та гарячого водопостачання будівель підприємств морського транспорту, але даний процес суттєво залежить від місцезнаходження об'єкта

та наявності доступу до певного оптимального для нього джерела низькопотенціальної теплової енергії.

Проведено термодинамічне дослідження енергоефективності застосування ГТН «грунт-вода» для системи теплопостачання підприємств морського транспорту при використанні ґрунту, як джерел низькопотенційної теплової енергії.

З'ясовано, що енергетична ефективність ГТН «грунт-вода», робочим тілом якого є пропан, оцінена коефіцієнтом перетворення COP ГТН і становить 3,5.

Методом ексергетичного аналізу оцінено ексергетичний ККД ГТН в залежності від середньотермодинамічних температур випаровування T_{cp}^B , конденсації T_{cp}^K і охолодження T_{cp}^{no} пропану та показано, що досконалість перетворення енергії в ТН «грунт-вода» становить 45%.

ЛІТЕРАТУРА

1. Маляренко В.А., Лисак Л.В. Енергетика, довідка, енергозбереження. Х: Рубікон. 2004. 368 с.
2. Безродний М.К., Пуховий І.І., Кутра Д.С. Теплові насоси та їх використання. Навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ». 2013. 312 с.
3. Остапенко О.П. Холодильна техніка та технологія. Теплові насоси. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ. 2015. 123 с.
4. Арсеньєв В.М., Мелейчук С.С. Теплові насоси: основи теорії і розрахунку. Навчальний посібник. Суми. СДУ. 2018. 364с.
5. Арсеньєв В.М. Теплонасосная технология энергозбереження. Суми: Вид-во СДУ. 2009. 251 с.
6. Босий М.В., Кузик О.В. Теплові насоси для опалення та гарячого водопостачання. Findings of modern engineering research and developments: Scientific monograph. Riga, Latvia: «Baltija Publishing», 2022, P. 24-40. <http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/book/217>
7. Пісарев В.Є. Теплові насоси та холодильні установки. Навчальний посібник. К: КНУБА. 2002. 124с.
8. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврін В.С., Дабіжа Н.О. Теплові насоси в системах теплохолодопостачання. Монографія. Під ред. акад. НАН України А.А. Долінського; НАН України, Ін-т техн. теплофізики. К: 2008. 104 с.
9. Безродний М.К., Припула Н.О. Енергетична ефективність теплонасосних схем теплопостачання. Монографія. К: НТУУ «КПІ». 2012. 208 с.
10. Шевель В.И. Работа компрессоров серийного исполнения на смеси пропан-бутан в теплонасосном режиме работы. Компрессорная техника и пневматика в XXI веке: XIII Международная научно-техническая конференция по компрессоростроению. Сумы: СумГУ. 2004. С. 239–244.
11. Хмельнюк М.Г., Мартынюк М.О. Повышение эффективности установки низкотемпературной конденсации природного газа. Одесса: ОДАХ. Технические газы. № 4. 2008. С. 30–35.
12. Босий М.В., Кузик О.В. Ефективність циклу теплового насоса для теплопостачання. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні*

- науки. 2020. Вип. 3(34). С. 136–142. <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/10447>
13. Босий М.В. Термодинамічна енергоефективність геотермального теплового насоса на ґрунтових водах. *Moderní aspekty vědy: XX. Díl mezinárodní kolektivní monografie. Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika: Publishing Group „Vědecká perspektiva“*, 2022. str. 556–568. <http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/monography-20.pdf>
 14. Босий М.В. Теплові насоси – енергоефективне відновлювальне екологічне чисте джерело теплоти. *Moderní aspekty vědy: XXI Díl mezinárodní kolektivní monografie Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika: Publishing Group “Vědecká perspektiva”*, 2022, P. 357–380. <http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/monography-21.pdf>
 15. Морозюк Т.В. Теория холодильных машин и тепловых насосов. Одесса: Студия «Негоциант». 2006. 712 с.
 16. Ткаченко С.Й., Остапенко О.П. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. Монографія. Вінниця: ВНТУ. 2009. 176 с.
 17. Арсеньев В.М., Гречаненко В.А. Эксергетическая оценка эффективности теплонасосной технологии энергосбережений. *Вісник Сумського державного університету*. 2002. №9(42). С. 81–85.
 18. Босий М.В., Кропівний В.М., Кузик О.В., Кропівна А.В., Молокост Л.А. Термодинамічна енергоефективність парокомпресійного теплового насоса на ґрунтових водах. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Кропивницький. 2022, вип. 5(36), ч. I. С. 47–54. http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/36_I.html
 19. Босий М.В., Кропівний В.М., Кузик О.В. Термодинамічне дослідження циклу теплового насосу «ґрунт-вода» для системи опалення приміщення. *Науковий журнал Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. Кременчук: №1(132), 2022. С. 165–172. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.1.22>. <http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/pravila.php>
 20. Сірко З.С., Коренда В.А., Вишняков І.Ю., Протасов О.С., Охріменко С.М., Цірень Н.Л. Використання теплових насосів для опалення та гарячого водопостачання будівель підприємств на прикладі установок Helioterm. *Наукові доповіді НУБіП України. Техніка і енергетика АПК*. № 5 (87). 2020.
 21. Босий М.В. Енергетична ефективність повітряного теплового насоса на екологічно чистому робочому тілі пропані // *Науковий журнал «Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського»*. Серія: Технічні науки». Київ: Том 33 (72), № 4, 2022. С. 144–148. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/22>. <https://tech.vernadskyjournals.in.ua/33-72-4>
 22. Босий М.В., Лисенко А.Я., Мануйлович В.В., Панішко О.В. Ефективність циклу геотермального теплового насосу. V Міжнародна

- науково-практична конференція «Актуальні питання сучасної науки, суспільства та освіти». The 5th International scientific and practical conference «Topical issues of modern science, society and education» (November 28–30, 2021) SPC «Sci-conf.com.ua», Kharkiv, Ukraine. 2021. 2101 p., с. 418–422. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/TOPICAL-ISSUES-OF-MODERN-SCIENCE-SOCIETY-AND-EDUCATION-28-30.11.21.pdf>
23. Босий М.В., Лисенко А.Я., Мануйлович В.В., Баркар М.М. Термодинамічна енергоефективність геотермального теплового насоса «вода-вода». The 3rd International scientific and practical conference “Modern science: innovations and prospects” (December 5–7, 2021) SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 2021. 1036 p. ISBN 978-91-87224-02-7. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/MODERN-SCIENCE-INNOVATIONS-AND-PROSPECTS-5-7.12.21.pdf>
24. Босий М.В., Лисенко А.Я., Мануйлович А.В., Панішко О.В., Баркар М.М. Геотермальний тепловий насос «грунт-вода». The 2nd International scientific and practical conference – “Modern research in world science” (May 15–17, 2022) SPC – “Sci-conf.com.ua”, Lviv, Ukraine. 2022. P.406-413. ISBN 978-966-8219-86-3. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/05/MODERN-RESEARCH-IN-WORLD-SCIENCE-15-17.05.22.pdf>
25. Босий М.В., Боса О.А., Лисенко А.Я., Мануйлович В.В., Бельченков Є.В., Шевченко О.А., Герасименко І.О. Термодинамічне дослідження циклу теплового насоса «грунт-вода». The 11th International scientific and practical conference “Eurasian scientific discussions” (November 21–23, 2022) Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain. 2022. p. 97–103. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/EURASIAN-SCIENTIFIC-DISCUSSIONS-21-23.11.22.pdf>
26. Босий М.В., Боса О.А., Лисенко А.Я., Мануйлович А.В., Бельченков Є.В., Шевченко О.А., Герасименко І.О. Енергоефективність циклу теплового насоса «грунт-вода». The 1st International scientific and practical conference “Scientific research in the modern world” (November 9-11, 2022) Perfect Publishing, Toronto, Canada. 2022. p. 303–309. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/SCIENTIFIC-RESEARCH-IN-THE-MODERN-WORLD-9-11.11.22.pdf>
27. Босий М.В., Боса О.А., Лисенко А.Я., Мануйлович А.В., Бельченков Є.В., Ботнаренко В.О., Авраменко Є.В. Тепловий насос «грунт-вода». The 3rd International scientific and practical conference “Science and technology: problems, prospects and innovations” (December 14–16, 2022) CPN Publishing Group, Osaka, Japan. 2022. С. 163–168. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/12/SCIENCE-AND-TECHNOLOGY-PROBLEMS-PROSPECTS-AND-INNOVATIONS-14-16.12.22.pdf>

REFERENCIS

1. Malyarenko, V. A., & Lysak, L. V. (2004). Energy, environment, energy saving [Enerhetyka, dovkilliya, enerhozberezhennya]. X: Rubicon. 368 p. [in Ukrainian].
2. Bezrodnyi, M.K., Pukhovii, I.I., & Kutra, D.S. (2013). Heat pumps and their use [Teplovi nasosy ta yikh vykorystannya]. Tutorial. Kyiv: NTUU "KPI". 312 p. [in Ukrainian].
3. Ostapenko, O.P. (2015). Refrigeration equipment and technology. Heat pumps [Kholodylna tekhnika ta tekhnolohiya. Teplovi nasosy]. Tutorial. Vinnytsia: VNTU. 123 p. [in Ukrainian].
4. Arsenyev, V.M., & Meleychuk, S.S. (2018). Heat pumps: basics of theory and calculation [Teplovi nasosy: osnovy teorii i rozrakhunku]. Tutorial. Sumy. SSU 364 p. [in Ukrainian].
5. Arsenyev, V.M. (2009). Heat pump energy saving technology [Teplonasosnaya tekhnolohyya enerhozberezhennya]. Sumy: Type of SDU. 251 p. [in Ukrainian].
6. Bosyi, M.V., & Kuzyk, O.V. (2022) Heat pumps for heating and hot water supply [Teplovi nasosy dlya opalennya ta haryachoho vodopostachannya]. Findings of modern engineering research and developments: Scientific monograph. Riga, Latvia: "Baltija Publishing". P. 24–40. [in Ukrainian]. <http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/book/217>
7. Pisarev, V.E. (2002). Heat pumps and refrigeration units [Teplovi nasosy ta kholodylni ustanovky]. Tutorial. K: KNUBA. 124 p. [in Ukrainian].
8. Snezhkin, Y.F., Chalayev, D.M., Shavrin, V.S., & Dabyzha, N.O. (2008). Heat pumps in heating and cooling systems [Teplovi nasosy v systemakh teplokhodopostachannya]. Monograph. Sub. ed. Acad. NAS of Ukraine A.A. Dolinskyi; National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Technology thermophysics. K: 104p. [in Ukrainian].
9. Bezrodnyi, M.K., & Prytula, N.O. (2012). Energy efficiency of heat pump heat supply schemes [Enerhetychna efektyvnist teplonasos-nykh skhem tep-lopustachannya]. Monograph. K: NTUU "KPI". 208 p. [in Ukrainian].
10. Shevel, V. I. (2004). Operation of series compressors for propane-butane oil in the heat pump mode [Rabota kompressorov seryynoho yspolnenyya na smecy propan–butan v teplonasosnom rezhyme raboty]. Compressor technology and pneumatics in the 21st century: 13th International Scientific and Technical Conference on Compressor Construction. Sumy: Sumy State University. P. 239–244. [in Ukrainian].
11. Khmelnyuk, M.G., & Martynyuk, M.O. (2008). Increasing the efficiency of a low-temperature natural gas condensation plant [Povyshenye éffektyvnosti ustanovky nyzkotemperaturnoy kondensatsyy pryrodnoho haza]. Odessa: ODAH. Technical gases. No. 4. P. 30–35. [in Ukrainian].
12. Bosyi, M.V., & Kuzyk, O.V. (2020). Efficiency of the heat pump cycle for heat supply [Efektyvnist tsykladu teplovoho nasosa dlya teplopustachannya]. Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences. Issue

- 3(34). P. 136–142. [in Ukrainian]. <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/10447>
13. Bosyi, M.V. (2022). Thermodynamic energy efficiency of a geothermal heat pump on groundwater [Termodynamichna enerhoefektyvnist heothermalnogo teplovoho nasosa na hruntovykh vodakh]. Modern aspects of science: XX. Díl international kolektivní monografie. International Economic Institute s.r.o. Česká republika: Publishing Group "Vědecká perspektiva". str. 556–568. [in Ukrainian]. <http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/monography-20.pdf>
14. Bosyi, M.V. (2022). Heat pumps – an energy-efficient regenerative ecologically clean source of heat [Teplovi nasosy – enerhoefektyvne vid-novlyuvalne ekolohi-čne chyste dzherelo teploty]. Moderní aspekty védy: XXÍ Díl international kolektivní monografie International Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika: Publishing Group "Vědecká perspektiva". P. 357–380. [in Ukrainian]. <http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/monography-21.pdf>
15. Morozyuk, T.V. (2006). Theory of refrigeration machines and heat pumps [Teoryya kholodylnykh mashyn y teplovykh nasosov]. Odessa: Studio "Negotiant". 712 p. [in Ukrainian].
16. Tkachenko, S.Y., & Ostapenko, O.P. Steam compression heat pump installations in heat supply systems [Parokompresiyini teplonasosni ustanovky v systemakh teplopostachannya]. Monograph. Vinnytsia: VNTU. 2009. 176 p. [in Ukrainian].
17. Arsen'ev, V.M., & Grechanenko, V.A. (2002). Exergetic evaluation of the efficiency of heat pump technology energy-saving [Ékserhetycheskaya otsenka éffektyvnosti teplonasosnoy tekhnolohyy énerhosberezheny]. Bulletin of Sumy State University. No. 9(42). P. 81–85. [in Ukrainian].
18. Bosiy, M.V., Kropivny, V.M., Kuzyk, O.V., Kropivna, A.V., & Molokost, L.A. Thermodynamic energy efficiency of a vapor compression heat pump on groundwater [Termodynamichna enerhoefektyvnist parokompresiyynoho teplovoho nasosa na hruntovykh vodakh]. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical sciences. Kropyvnytskyi. 2022, issue 5(36), part I. S. 47–54. [in Ukrainian]. http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/36_I.html
19. Bosyi, M.V., Kropivny, V.M., & Kuzyk, O.V. (2022). Thermodynamic study of the soil-water heat pump cycle for the space heating system [Termodynamichne doslidzhennya tsykladu teplovoho nasosu «hrunt-voda» dlya systemy opalennya prymishchennya]. Scientific journal Visnyk of the Kremenchug National University named after M. Ostrogradskyi. Kremenchuk: No. 1(132). P. 165ж172. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.1.22>. <http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/pravila.php>
20. Sirko, Z.S., Korenda, V.A., Vyshnyakov, I.Yu., Protasov, O.S., Okhrimenko, S.M., & Tsieren, N.L. (2020). The use of heat pumps for heating and hot water supply of enterprise buildings on the example of Heliotherm installations [Vykorystannya teplovykh nasosiv dlya opalennya ta haryachoho vodopostachannya budivel pidpryyemstv na prykladi

- ustanovok Helioterm]. Scientific reports of NUBiP of Ukraine. Technology and energy of agricultural industry. No. 5(87). [in Ukrainian].
21. Bosyi, M.V. (2022). The energy efficiency of an air heat pump based on an ecologically clean working medium of propane [Enerhetychna efektyvnist povitryanoho teplovoho nasosa na ekolohichno chystomu robochomu tili propani]. Scientific journal "Scientific notes of V.I. Tavrii National University". Vernadsky". Series: Technical sciences". Kyiv: Volume 33(72), No. 4. P. 144–148. [in Ukrainian]. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/22>. <https://tech.vernadskyjournals.in.ua/33-72-4>
 22. Bosyi, M.V. Lysenko, A.Ya., Manuylovich, V.V., & Panishko, O.V. (2021). Efficiency of the geothermal heat pump cycle [Efektyvnist tsykladu heotermalnoho teplovoho nasosu]. 5th International scientific and practical conference "Actual issues of modern science, society and education". The 5th International scientific and practical conference "Topical issues of modern science, society and education" (November 28–30) SPC "Sci-conf.com.ua", Kharkiv, Ukraine. 2101 p., p. 418–422. [in Ukrainian]. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/TOPICAL-ISSUES-OF-MODERN-SCIENCE-SOCIETY-AND-EDUCATION-28-30.11.21.pdf>
 23. Bosyi, M.V. Lysenko, A.Ya., Manuylovich, V.V., & Barkar, M.M. (2021). Thermodynamic energy efficiency of geothermal heat pump "water-water" [Termodynamichna enerhoefektyvnist heotermalnoho teplovoho nasosa «voda-voda»]. The 3rd International scientific and practical conference "Modern science: innovations and prospects" (December 5–7, 2021) SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 1036 p. ISBN 978-91-87224-02-7 [in Ukrainian]. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/MODERN-SCIENCE-INNOVATIONS-AND-PROSPECTS-5-7.12.21.pdf>
 24. Bosyi, M.V., Lysenko, A.Ya., Manuylovich, A.V., Panishko, O.V., & Barkar, M.M. (2022). Ground-water geothermal heat pump [Heotermalnyi teplovyi nasos «hrunt-voda»]. The 2nd International scientific and practical conference "Modern research in world science" (May 15–17 2022). SPC "Sci-conf.com.ua", Lviv. Ukraine. P.406-413. ISBN 978-966-8219-86-3 [in Ukrainian]. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/05/MODERN-RESEARCH-IN-WORLD-SCIENCE-15-17.05.22.pdf>
 25. Bosyi, M.V., Bosa, O.A., Lysenko, A.Ya., Manuylovich, V.V., Belchenkov, E.V., Shevchenko, O.A., Gerasimenko, I.O. (2022). Thermodynamic study of the soil-water heat pump cycle [Termodynamichne doslidzhennia tsykladu teplovoho nasosa «hrunt-voda»]. The 11th International scientific and practical conference "Eurasian scientific discussions" (November 21-23, 2022) Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain. p. 97–103. [in Ukrainian]. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/EURASIAN-SCIENTIFIC-DISCUSSIONS-21-23.11.22.pdf>

26. Bosiy, M.V., Bosa, O.A., Lysenko, A.Ya., Manuylovich, A.V., Belchenkov, E.V., Shevchenko, O.A., Gerasimenko, I.O. (2022). Energyefficiency of the heat pump cycle "ground- water" [Enerhoefektyvnist tsykladu teplovoho nasosa «hrunt-voda»]. The 1st International scientific and practical conference "Scientific research in the modern world" (November 9–11) Perfect Publishing, Toronto, Canada. p. 303–309. [in Ukrainian]. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/SCIENTIFIC-RESEARCH-IN-THE-MODERN-WORLD-9-11.11.22.pdf>
27. Bosyi, M.V., Bosa, O.A., Lysenko, A.Ya., Manuylovich, A.V., Belchenkov, E.V., Botnarenko, V.O., Avramenko, E.V. (2022). Heat pump "soil-water" [Teplovyi nasos «hrunt-voda»]. The 3rd International scientific and practical conference "Science and technology: problems, prospects and innovations" (December 14–16) CPN Publishing Group, Osaka, Japan. P. 163–168. [in Ukrainian]. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/12/SCIENCE-AND-TECHNOLOGY-PROBLEMS-PROSPECTS-AND-INNOVATIONS-14-16.12.22.pdf>

FEATURES OF DEFORMING OF COMPOSITE INDUCTORS DURING ELECTROMAGNETIC PROCESSING OF MATERIALS

D.V. Lavinsky¹, G.O. Anischenko², V.I. Konokhov³

¹Dr. Ing. Sci., Associate Professor, Head of the Department
«Theoretical Mechanics and Strength of Materials»,
National Technical University
«Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-1380-3131

²PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department
«Theoretical Mechanics and Strength of Materials»,
National Technical University
«Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-6818-4980

³PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department
«Theoretical Mechanics and Strength of Materials»,
National Technical University
«Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-9938-2040

Summary

Introduction. The development of many branches of mechanical engineering at the current stage requires the development and application of new technologies that are characterized by high energy efficiency and a small amount of waste. Such technologies include those that use electromagnetic field energy. The energy of the electromagnetic field can be used to change the shape of workpieces, to connect individual structural elements (for example, by welding), to control the physical properties of the material (for example, by induction heating), etc. Carrying out calculation studies at the stage of designing and proving the appropriate technological equipment allows determining the rational values of key parameters, which ensures the achievement of the goals of the technological operation and the operability of the equipment. **Purpose.** When the energy of the electromagnetic field is used to exert a force on the processed workpiece, the technological equipment is equally subject to force. The purpose of the article is to create effective methods of calculating the strength of technological equipment together with the workpiece, and conducting the corresponding calculation analysis is an urgent task in the scientific and practical sense. **Results.** The article proposes an effective method of analyzing the elastic-plastic deformation of composite structures under the influence of an electromagnetic field. The general mathematical formulation of the coupled problem of the deformation of conductive bodies in the presence of an electromagnetic field is considered. To construct a numerical solution method, the initial problem is reduced to finding the minimum of the total energy of the system. The finite element method is used as a numerical solution method. The proposed method is applied to the

analysis of the deformation of the "inductor-workpiece" system of the technological operation of magnetic pulse processing of metals. Conclusions. Some results are presented that allow making certain recommendations regarding the design and application of technological operations of a similar class.

Key words: *non-stationary deformation, electromagnetic field, the finite el-ement method, magnetic-pulse processing.*

ОСОБЛИВОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ СКЛАДЕНИХ ІНДУКТОРІВ ПРИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІЙ ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ

Д.В. Лавінський¹, Г.О. Аніщенко², В.І. Конохов³

¹д.т.н., доцент, завідувач кафедри «Теоретична механіка та опір матеріалів»,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна
ORCID ID: 0000-0002-1380-3131

²к.т.н., доцент, доцент кафедри «Теоретична механіка та опір матеріалів»,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна
ORCID ID: 0000-0002-6818-4980

³к.т.н., доцент, доцент кафедри «Теоретична механіка та опір матеріалів»,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна
ORCID ID: 0000-0002-9938-2040

Анотація

Вступ. Розвиток багатьох галузей машинобудування на сучасному етапі потребує розробки і застосування нових технологій, які характеризуються високою енергоефективністю та малою кількістю відходів. До таких технологій відносяться ті, що використовують енергію електромагнітного поля. Енергія електромагнітного поля може використовуватись для формозміни заготовок, для з'єднання окремих елементів конструкції (наприклад шляхом зварювання), для керованої зміни фізичних властивостей матеріалу (наприклад, шляхом індукційного нагріву) тощо. Проведення розрахункових досліджень на етапі проектування та доведення відповідного технологічного оснащення дозволяє визначати раціональні значення ключових параметрів, що забезпечує досягнення цілей технологічної операції та працездатність обладнання. **Мета.** При використанні енергії електромагнітного поля для силового впливу на оброблювану заготовку в рівній мірі силовому впливу піддається і технологічне обладнання. Метою статті є створення ефективних методів розрахунків на міцність технологічного оснащення разом із заготовкою та проведення відповідного розрахункового аналізу є актуальною задачею у науковому та практичному сенсі. **Результати.** У статті запропоновано ефективний метод аналізу пружно-пластичного деформування складених конструкцій під дією електромагнітного поля. Розглянуто загальну математичну постановку зв'язаної задачі деформування електропровідних тіл при наявності електромагнітного поля. Для побудови методу чисельного розв'язку вихідна задача зведена до пошуку мінімуму повної енергії системи.

В якості чисельного методу розв'язання використовується метод скінчених елементів. Запропонований метод застосований для аналізу деформування системи „індуктор–заготовка” технологічної операції магнітно-імпульсної обробки металів. Висновки. Представлені деякі результати, які дозволяють робити певні рекомендації щодо проектування та застосування технологічних операцій подібного класу.

Ключові слова: пружно-пластичне деформування, електромагнітне поле, метод скінчених елементів, магнітно-імпульсна обробка.

Introduction. The development of many branches of mechanical engineering at the current stage requires the development and application of new technologies that are characterized by high energy efficiency and a small amount of waste. Such technologies include those that use electromagnetic field (EM-field) energy. The energy of the EM-field is used for a large number of technological operations. The energy of the electromagnetic field can be used to change the shape of workpieces, to connect individual structural elements (for example, by welding), to control the physical properties of the material (for example, by induction heating), etc. The force effect of EM-field on the processed workpiece is used during magnetic pulse processing of materials (MPPM). Carrying out calculation studies at the stage of designing and proving the appropriate technological equipment allows determining the rational values of key parameters, which ensures the achievement of the goals of the technological operation and the operability of the equipment.

Formulation of the problem. In the case of MPPM, not only the workpiece but also the tool – the inductor – is exposed to electromagnetic forces. An increase in the magnitude of electromagnetic forces leads to more intensive deformation of both the workpiece and the inductor, which can lead to the loss of its efficiency. Therefore, the creation of effective methods for the analysis of elastic-plastic deformation of elements of technological systems of MPPM and subsequent calculation of strength is an urgent scientific and practical problem.

Analysis of recent research and publications. A review of issues related to aspects of the creation and application of devices that use the energy of EM-field for technological purposes is quite fully given in the works [1–4]. Modern directions of development of MPPM for processing non-traditional objects are presented in the works [5, 6]. It should be noted that the majority of scientific publications, for example [7] devoted to the problems of calculation and design of technological operations of MPPM are focused on studies of workpiece deformation. At the same time, the inductor, which also experiences significant mechanical effects, is practically not studied anywhere.

Mathematical formulation of the problem. Let us give a brief mathematical formulation of the problem, based on the general relationships shown in the article [8].

The distribution of the vector components of the EM-field in and electrically conductive body is described by the system of Maxwell's fundamental equations, which are supplemented by material dependencies and boundary conditions:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \epsilon_c \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{j}; \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu_c \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}; \vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0; \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0; \vec{j} = \gamma_c \vec{E} + \gamma_c [\dot{\vec{u}} \times \vec{B}]; \quad (1)$$

$$\vec{D} = \varepsilon_c \vec{E}; B = \mu_c \vec{H}; \vec{E}_\Gamma \times \vec{n} = 0; \vec{D}_\Gamma \cdot \vec{n} = 0; \vec{H}_\Gamma \times \vec{n} = 0; \vec{B}_\Gamma \cdot \vec{n} = 0, \quad (2)$$

where $\vec{H}, \vec{E}, \vec{H}_\Gamma, \vec{E}_\Gamma$ are the vectors of the intensity of the magnetic and electric fields in the volume of the body and at the boundary (Γ) of the body; $\vec{D}, \vec{B}, \vec{D}_\Gamma, \vec{B}_\Gamma$ are the vectors of electric and magnetic induction in the volume of the body and on the boundary (Γ) of the body; $\varepsilon_{\vec{n}}, \mu_c, \gamma$ are the electrical and magnetic permeability, and electrical conductivity of the material; \vec{j} is the current density vector; \vec{n} is the vector of normal to the boundary of the body.

The distribution of stress $\vec{\sigma}$ and strain $\vec{\varepsilon}$ tensor components, as well as the displacement vector \vec{u} , is subjected to a system of equations that contains differential equations of equilibrium, geometric dependencies, material state dependencies, and boundary conditions:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \varepsilon_c \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{j}; \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu_c \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}; \vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0; \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0; \vec{j} = \gamma_c \vec{E} + \gamma_c [\dot{\vec{u}} \times \vec{B}]; \quad (3)$$

where ρ is the material density; \vec{f} is the intensity vector of volume forces (in the case of taking into account electromagnetic forces $\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B}$); ${}^{(4)}\vec{S}$ is the the 4th-rank correspondence tensor, which in the case of elastic deformation has the form according to Hooke's linear law; \vec{p} is the surface load; Ξ, \vec{i} are the densities of surface charges and currents. When considering elastic-plastic deformation, the behavior of the material is considered in the incremental form (4) together with the condition of plasticity (5):

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \varepsilon_c \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{j}; \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu_c \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}; \vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0; \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0; \vec{j} = \gamma_c \vec{E} + \gamma_c [\dot{\vec{u}} \times \vec{B}]; \quad (4)$$

$$\sqrt{\frac{3}{2} \text{tr}((\vec{s} - \vec{\beta})^2)} - \sigma_T = 0, \quad (5)$$

where σ_i is the stress intensity according to von Mises; \vec{I} is the unit tensor; $\vec{\sigma}_0$ is the spherical stress tensor; \vec{s} is the stress deviator; $\vec{\varepsilon}^p$ is the plasticity strain tensor; ε_i^p is the intensity of plastic deformations; E is the modulus of elasticity; ν is the Poisson's ratio; σ_T is the yield strength; E_h is the modulus of hardening.

Analysis of elastic-plastic deformation of systems of electrically conductive bodies of complex geometry requires the use of numerical methods. The most universal methods include the finite element method (FEM). FEM allows considering the distribution of vector components of the electromagnetic field (EM-field) and tensor components of the deformation process within the framework of a single calculation scheme. In this case, the specific implementation of the FEM is based on the variational principle of stationarity of the total energy of the system of conductive bodies. First, to reduce the number of equations that describe the EM-field distribution, we consider the vector magnetic potential, which is related to the main vector components of the EM-field as follows:

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}; \quad (6)$$

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = \mu_c \vec{j},$$

where \vec{A} is the vector magnetic potential. Equations (6) are written for the case of neglecting the non-linear "magnetic" behavior of the material (which is characteristic of non-magnetic steels and alloys based on aluminum or copper) and without taking into account the "electric" component of the EM-field, because its contribution is insignificant for the analysis of the deformation of conductive bodies. The expression of total energy has the following form:

$$E = U + W, \quad (7)$$

where U is the energy of quasi-elastic deformation; W is the EM-field energy (neglecting the electric component).

$$U = \frac{1}{2} \int_V \bar{\varepsilon} \cdot {}^{(4)}C \cdot \bar{\varepsilon} dV - \int_V (\vec{j} \times \vec{B}) \cdot \vec{u} dV - \int_{A_p} \left(\vec{p} + \frac{1}{2} \vec{i} \times \vec{B} \right) \cdot \vec{u} dA, \quad (8)$$

$$W = \int_V \left(\frac{1}{2} |\vec{\nabla} \times \vec{A}|^2 - \vec{j} \cdot \vec{A} \right) dV, \quad (9)$$

where $\bar{\varepsilon}$ is the strain tensor; ${}^{(4)}C$ is the tensor of elasticity coefficients; \vec{u} is the displacement vector; \vec{p} is the surface load; \vec{i} is the surface current density.

The solution must satisfy the following variational equation:

$$\delta E = \delta U + \delta W = 0. \quad (10)$$

Equality (5) ultimately leads to the solution of two independent systems of algebraic equations with respect to nodal displacements and nodal values of the vector magnetic potential. In the case of plastic deformation, an iterative process should be considered, the features of which are discussed in the article [8].

Calculation example. We will apply this method to analyze the deformation of the system of electrically conductive bodies under the conditions of the MPPM technological operation. Let's consider a technological operation aimed at attraction of thin non-magnetic metal blanks, the practical direction of this operation is the correction of defects in body elements of transport equipment.

Works [5,6] show that an inductor with an auxiliary screen can be used to attract workpieces made of non-ferromagnetic materials. Figure 1 shows a model version of a single-turn inductor with an auxiliary screen.

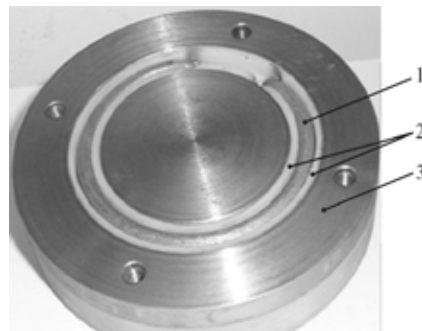


Fig. 1. Single-turn inductor with an auxiliary screen. 1 – current conductor of the inductor; 2 – insulation of the current conductor; 3 – auxiliary screen

Let's analyze the elastic-plastic deformation of the inductor with the work-piece within the framework of the axisymmetric calculation scheme shown in Fig. 2. The calculation scheme contains, in addition to the elements of the technological system and the workpiece, the surrounding environment (air). The gap considered between the inductor and the workpiece should simulate the presence of a dent (defect) on the workpiece. The geometric parameters of the system are as follows: $R_1 = 150$ mm, $R_2 = 167$ mm, $R_3 = 175$ mm, $R_4 = 200$ mm, $h_1 = 10$ mm, $h_2 = 15$ mm, $h_3 = 1$ mm, $d = 1$ mm, insulation thickness of the current conductor – 1 mm. The dimensions of the surrounding medium were varied in order to achieve the conditions for the attenuation of the EM-field components in fields far from the source. In this case, it turned out that to reduce the EM-field components by a factor of 5, it is enough to choose the dimensions of the surrounding environment equal to twice the thickness of the inductor h_2 . The source of EM-field was a current that was uniformly distributed over the cross-section of the conductor, the current density changed according to the law over time: $j(t) = I_m e^{-\delta 2\pi f t} \cdot \sin(2\pi f t)$, where the amplitude of the current $I_m = 40$ kA, frequency $f = 2$ kHz, relative attenuation coefficient $\delta = 0.3$.

The finite-element model was created using a four-node finite element with a bilinear approximation of displacements and a circular component of the vector magnetic potential [9,10]. The using of a finite element of this type allows you to automatically satisfy the conditions at the interfaces of media with different electro-physical properties.

The solution was carried out for zero initial conditions, the boundary conditions reflected the attenuation of the EM-field at a distance from the source, as well as the fixing of the ends of the inductor and the workpiece:

$$A|_{\Gamma_1} = 0; \quad u_r|_{\Gamma_2} = 0; \quad u_z|_{\Gamma_2} = 0. \quad (11)$$

At the first stage of the solution, the spatio-temporal distributions of the vector components of the EM-field and the components of the electromagnetic force along the top of the workpiece were obtained. The maximum values of the normal component of the electromagnetic force are observed in the vicinity of the inductor coil.

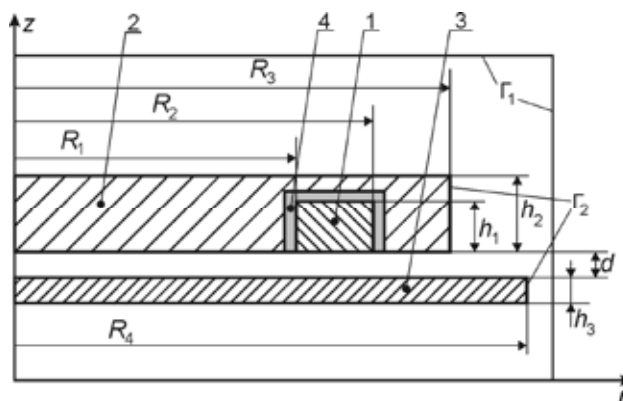


Fig. 2. Calculation scheme of the inductor together with the workpiece. 1 – current conductor of the inductor, 2 – auxiliary screen, 3 – workpiece, 4 – insulation of the current conductor

Table 1

Physic-mechanical parameters of system elements

	current conductor, copper	auxiliary screen, steel	workpiece, steel	insulation, kaprolon	air
μ_r	1	1	1	1	1
$\gamma, (\Omega\text{m})^{-1}$	7×10^7	0.2×10^7	0.2×10^7	0	0
E, GPa	180	215	200	2.5	–
ν	0.33	0.27	0.29	0.3	–
σ_{T_2} MPa	200	270	220	–	–
$\sigma_{B_2}^+$ MPa	–	–	–	70	–
$\sigma_{B_2}^-$ MPa	–	–	–	90	–

Next, we consider the combined deformation of the inductor and the workpiece, the results are given for the time maximum. In fig. 3 shows the deformed state of the system, it can be seen that the displacements of the workpiece significantly exceed the displacements of the inductor. The maximum values of workpiece motions are observed around its center. In fig. 4 shows the distribution of stress intensity in the inductor and the workpiece. The maximum stress intensity values in the workpiece are observed in the vicinity of the end zone, which is determined by the fixing

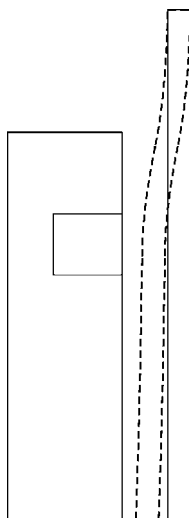


Fig. 3. The deformed state of the inductor and workpiece. The solid line is the initial state, the dashed line is the deformed state

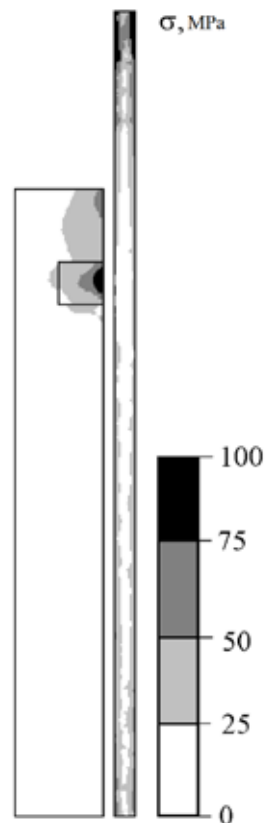


Fig. 4. Stress intensity in the inductor and the workpiece

conditions specified there. The "second" maximum is observed in the center, which is due to the maximum displacements in this zone. Note that the maximum values of stress intensity in the workpiece do not reach the yield point, that is, irreversible deformation under these conditions is not achieved. In the inductor, the maximum intensity is observed in the vicinity of the turn, and its values almost reach the yield point of copper and the tensile strength limit for kaprolon.

Thus, under the considered conditions, the goal of the technological operation is not achieved. When the magnitude of the current strength increases, the magnitude of the stresses will also increase, while the intensity of the stresses will reach vaporous values first in the inductor. To achieve a complete technological operation, you can use a multi-turn version of the inductor.

Conclusions: the article formulates an actual scientific and practical problem of elastic-plastic deformation of structural elements under the action of an electromagnetic field, presents a mathematical formulation of the problem, and gives an example of a solution.

ЛІТЕРАТУРА

1. Herlach F. Strong and ultrastrong magnetic fields and their applications. 1985. Vol. 57. 367 p.
2. Sandstrom D.J. Consolidating metal powders magnetically. *Metal. Progr.* 1964. vol. 86 (3). pp. 215–221.
3. Psyk V., Risch D., Kinsey B.L., Tekkaya A.E., Kleiner M. Electromagnetic forming – a review. *Journal of Materials Processing Technology.* 2011. vol. 211(5). pp. 787–829.
4. Mamalis A.G., Manolakos D.E., Kladas A.G., Koumoutsos A.K. Electromagnetic forming and powder processing: trends and developments. *Applied Mechanics Reviews.* 2004. vol. 57(4). pp. 299–324.
5. Batygin Y.V., Golovashchenko S.F., Gnatov A.V. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals-fundamentals and perspective applications. *Journal of Materials Processing Technology.* 2013. vol. 213(3). pp. 444–452.
6. Batygin Y. V., Golovashchenko S. F., Gnatov A. V. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology.* 2014. vol. 214(2). pp. 390–401.
7. Stiemer M., Unger J., Svendsen B., Blum H. Algorithmic formulation and numerical implementation of coupled electromagnetic-inelastic continuum models for electromagnetic metal forming. *International journal for numerical methods in engineering.* 2006. no. 68 (13). pp. 1301–1328.
8. Altenbach H., Morachkovsky O., Naumenko K., Lavinsky D. Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields. *Continuum Mechanics and Thermodynamic.* 2016. Vol. 28(5). pp. 1421–1433.
9. Cazzani A., Atluri S. N. Four-noded mixed finite elements, using unsymmetric stresses, for linear analysis of membranes. *Comput. Mech.* 1993. Vol. 11(4). pp. 229–251.
10. Cazzani A., Garusi E., Tralli A., Atluri S. N. A four-node hybrid assumed-strain finite element for laminated composite plates. *CMC Comput. Mater. Contin.* 2005. Vol, 2(1). pp. 23–38.

REFERENCES

1. Herlach, F. (1985). Strong and ultrastrong magnetic fields and their applications, 57, 367.
2. Sandstrom, D.J. (1964). Consolidating metal powders magnetically. *Metal Progr*, 86 (3), 215–221.
3. Psyk, V. & Risch, D. & Kinsey, B.L. & Tekkaya, A.E. & Kleiner, M. (2011). Electromagnetic forming – a review. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(5), 787–829.
4. Mamalis, A.G. & Manolacos, D.E. & Kladas, A. G. & Koumoutsos, A.K. (2004). Electromagnetic forming and powder processing: trends and developments. *Applied Mechanics Reviews*, 57(4), 299–324.
5. Batygin, Y.V. & Golovashchenko, S.F. & Gnatov, A.V. (2013). Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals—fundamentals and perspective applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(3), 444–452.
6. Batygin, Y. V. & Golovashchenko, S. F. & Gnatov, A. V. (2014). Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(2), 390–401.
7. Stiemer, M. & Unger, J. & Svendsen, B. & Blum H. (2006). Algorithmic formulation and numerical implementation of coupled electromagnetic-inelastic continuum models for electromagnetic metal forming. *International journal for numerical methods in engineering*, 68 (13), 1301–1328.
8. Altenbach, H. & Morachkovsky, O. & Naumenko, K. & Lavinsky, D. (2016). Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields. *Continuum Mechanics and Thermodynamic*, 28(5), 1421–1433.
9. Cazzani, A. & Atluri, S. N. (1993). Four-noded mixed finite elements, using unsymmetric stresses, for linear analysis of membranes. *Comput. Mech*, 11(4), 229–251.
10. Cazzani, A. & Garusi, E. & Tralli, A. & Atluri, S.N. (2005). A four-node hybrid assumed-strain finite element for laminated composite plates. *CMC Comput. Mater. Contin*, 2(1), 23–38.

РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.5.06

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.03>

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ПОРУШЕННЯ ПРОТІКАННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ СУДНОВОГО ДВИГУНА MAN B&W 8L48/60 НА ДИНАМІЧНІ ПОКАЗНИКИ КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНІЗМУ

М.О. Бойко¹, В.П. Савчук², Д.О. Зінченко³

¹аспірант, старший викладач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, ORCID ID: 0000-0003-4945-2043

²к.т.н., доцент, завідувач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, ORCID ID: 0000-0002-5266-850X

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

Анотація

Вступ. Надано оцінку застосування аналізу крутильних коливань динамічних моделей двигунів внутрішнього згоряння для розробки та вдосконалення діагностичних комплексів. Зниження експлуатаційних витрат сучасних суднових середньооборотних двигунів (СОД), що пов'язані із вартістю робіт з технічного обслуговування та ремонту, можливе за рахунок оснащення суднових енергетичних установок системами безперервного моніторингу ефективності протікання робочих процесів в циліндрах двигунів. Складність динамічної системи дизеля та стохастична природа виникнення несправностей потребує детального дослідження впливу зміни технічного стану систем та механізмів двигуна на показники крутильних коливань. Одним із ефективних засобів такого дослідження є комп'ютерне моделювання із використанням спеціалізованих програмних комплексів. **Мета.** Дана стаття присвячена дослідженню динамічних процесів механічних систем двигунів внутрішнього згоряння, що використовуються для моделювання крутильних коливань в програмному комплексі GT-SUITE. Надано опис комп'ютерної 1-D моделі суднового дизеля MAN 8L48/60 та особливостей налаштування головних шаблонів для моделювання динамічних процесів справного двигуна та такого, що має порушення протікання робочого процесу 5-го циліндру. **Результати.** Порівняння результатів моделювання вказують на те, що різниця кутових прискорень маховика складає 3033 рад/с², а на вільному кінці – 20652 рад/с² для номінального режиму навантаження. Встановлено вплив гармонічних коливань елементів на значення величин кутових прискорень колінчастого

валу. Висновки. З'ясовано, що основний вплив здійснюють гармонічні коливання четвертого порядку, що перевищують інші в 6 і більше разів.

Ключові слова: судновий двигун, кривошипно-шатунний механізм, крутильні коливання, динамічні процеси, моделювання, кутові прискорення маховика, колінчастий вал.

DETERMINATION OF A MAN B&W 8L48/60 MARINE ENGINE WORKFLOW DISRUPTION INFLUENCE ON THE DYNAMIC INDICATORS OF THE CRANK MECHANISM

M.O. Boyko¹, V.P. Savchuk², D.O. Zinchenko³

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

²Candidate 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

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

Summary

Introduction. The application of torsional oscillation analysis of dynamic models of internal combustion engines for the diagnostic complexes development and improvement is evaluated. Reducing the operating costs of modern marine medium-speed engines (MSE), associated with the cost of maintenance and repair, and is possible by equipping ship power plants with systems for continuous monitoring of the workflow efficiency in engine cylinders. The complexity of the diesel engine dynamic system and the stochastic nature of malfunctions occurrence requires a detailed study of the impact of engine systems and mechanisms technical condition changes on the indicators of torsional oscillations. One of the effective means of such research is computer modeling using specialized software packages. **Purpose.** A description of the objects of the dynamic processes research module of internal combustion engines mechanical systems, used to simulate torsional oscillations in the GT-SUITE software package, is presented. A description of a computer 1-D model of the MAN 8L48/60 marine diesel engine and the features of setting up the main templates for modeling the dynamic processes of a serviceable engine and an engine with a disruption of the 5th cylinder workflow are presented. **Results.** Comparison of the simulation results indicates that the difference in flywheel angular accelerations is 3033 rad/s^2 , and at the free end is 20652 rad/s^2 for the nominal load mode. The effect of elements harmonic oscillations on the value of the crankshaft angular accelerations is established. **Conclusions.** It has been established that the main influence is exerted by fourth-order harmonic oscillations, exceeding the others by 6 or more times.

Key words: marine engine, crank mechanism, torsional oscillations, dynamic processes, modeling, flywheel angular accelerations, crankshaft.

Вступ та постановка проблеми. Двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) є джерелом вібрацій, що виникають в результаті періодичної дії сил газів та інерції. Ці сили викликають згинальні, осьові та крутильні коливання. Перші два види коливань не впливають на термін служби деталей кривошипно-шатунного механізму (КШМ), однак, незалежно від динаміки роботи двигуна, крутильні коливання найбільш небезпечні для його колінчастого валу. Як особливий вид вібрації крутильні коливання зазвичай використовують для опису крутильно-деформаційних рухів валів, що обертаються [1]. Причини крутильних коливань колінчастого валу ДВЗ можна розділити на дві категорії: внутрішні та зовнішні. Внутрішні та зовнішні причини крутильних коливань колінчастого валу обумовлені відповідно пружними деформаціями тіла колінчастого валу та періодичною дією крутних моментів, що діють на нього. Деталі КШМ можна вважати крутильною системою, яку можна моделювати за допомогою моделі зі зосередженою масою. Дослідження закономірностей розвитку крутильних коливань та вплив на них протікання робочих процесів ДВЗ є перспективним напрямком, що забезпечить умови для розвитку систем безперервного моніторингу. Контроль розбалансування потужності за циліндрами, порушення протікання робочого процесу в одному чи декількох циліндрах та виявлення роботи двигуна в критичній зоні частоти обертання можливо здійснити шляхом контролю за параметрами коливань обертальних деталей. Важливим питанням, що потребує ретельного дослідження, є вдосконалення методів та алгоритмів діагностування для конкретних типів ДВЗ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню впливу крутильних коливань на динамічні показники КШМ присвячено безліч публікацій. В роботі [2] досліджено вплив на кутові зміщення кривошипів змінних характеристик інерції КШМ (до цього ефекти змінної інерції ДВЗ вважалися незначними та не враховувалися у розрахунках). Методику прогнозування поведінки крутильних коливань ДВЗ в перехідному режимі методом модального накладання представлено в роботі [3] та взаємозв'язок зміни інерції кутового положення колінчастого валу з осьовими згинальними коливаннями описано в роботі [4]. В роботі [5] запропоновано теоретичну та гібридну моделі для оцінки коефіцієнтів демпфування; зокрема визначені абсолютні коефіцієнти демпфування в залежності від кута повороту колінчастого валу в [6]. Дослідження в напрямку застосування динамічних моделей для виявлення несправностей КШМ та порушення протікання робочого процесу наведено в роботах [7, 8].

Формулювання цілей статті. Враховуючи високу вартість експлуатаційних витрат сучасних суднових середньооберткових двигунів (СОД), що пов'язані із вартістю робіт з технічного обслуговування та ремонту, важливим є завдання оснащення суднових енергетичних установок системами безперервного моніторингу ефективності протікання робочих процесів в циліндрах двигунів. Таке завдання потребує проведення в першу чергу теоретичних та експериментальних досліджень динамічних показників при різних ймовірних порушеннях протікання робочого процесу. Одним із ефективних засобів такого дослідження є проведення комп'ютерного моделювання із використанням спеціалізованих програмних комплексів, таких як GT-SUITE, AVL та ін. З метою визначення закономірностей впливу параметрів робочого процесу на динамічні показники суднового дизеля,

на прикладі двигуна MAN 8L48/60, ставиться задача моделювання його динаміки в програмному комплексі GT-SUITE.

Виклад основного матеріалу.

Методологія частотного аналізу програмного комплексу GT-SUITE Програмний комплекс GT-SUITE має механічний вирішувач у частотній області, який наразі обмежений топологіями та шаблонами одновимірних механічних моделей. Це дозволяє виконувати два типи частотного аналізу:

- аналіз вільних вібрацій без згасання.
- аналіз демпфованої примусової вібрації.

Аналіз частоти можна запросити в GT-SUITE, підключивши до об'єкту «TorsFreqAnalysis» в кінці системи вибраних одновимірних механічних примітивів або спеціалізованих компонентів, які використовуються для моделювання (колінчастий вал, маховик, шатуни і т.д.). Такі системи, тобто крутильні кластери та застосовувані до них моменти навантаження, ідентифікуються об'єктом «TorsFreq-Analysis», який автоматично збирає їх матриці маси, жорсткості та демпфування, обробляє моменти навантаження та виконує вільний та/або примусовий частотний аналіз кластера. Об'єкт «TorsFreqAnalysis» також посилається на об'єкт «ForcedFreqAnalysis», параметри якого використовуються для налаштування та керування аналізом і вибором бажаних результатів.

Щоб виконати аналіз примусової реакції для такої системи, крутні моменти можуть застосовуватися:

- 1) підключення об'єкту «Torque» до об'єкту «Inertia» через пряме з'єднання;
- 2) підключення об'єкту «CrankSlider» до «Inertia» через «RigidConn» і застосування граничної умови тиску до «поршневого» лінку «CrankSlider» за допомогою компонента «EngCylPres» або «Pressure» та «PressureConn» підключення. У цьому випадку крутний момент, що змодельовано в шаблоні «Inertia», буде отримано шляхом розв'язку рівнянь руху КШМ.

Під час аналізу примусової реакції періодичні зміни прикладеного крутного моменту, змодельовані будь-яким із наведених вище підходів, автоматично розкладаються та виражені в термінах гармонік у частотній області для цілей аналізу.

Пружну систему створюють за допомогою шаблонів деталей і з'єднань, таких як: «Journal», «ShaftSegment», «CrankWeb», «CrankPin», «Flywheel», «BalanceShaft», «SplitPinTransPlate», «Gear», «Sprocket», «Pulley», «CamLobe» і «ShaftConn», для яких пружні та динамічні властивості (тобто момент інерції, жорсткість на кручення, коефіцієнт демпфування на кручення) можуть бути призначені або розраховані на основі геометрії та властивостей матеріалу. Вузли шаблону «CrankPin» враховують інерцію зворотно-поступального вузла за виразом:

$$I_{pin, effective} = I_{pin} + M_{rot} R^2 + \frac{(M_{recip} + M_{piston})}{2} R^2,$$

- де I_{pin} – інерція мотилевої шийки;
 M_{rot} – маса обертання шатуна;
 M_{recip} – поступальна маса шатуна;
 M_{piston} – маса поршня;
 R – радіус повороту кривошипа.

Для виконання частотного аналізу в системі, що складається з згаданих вище шаблонів деталей, параметр аналізу в головній частині CrankAnalysis встановлюється як «Torsion». Для спеціалізованих складових компонентів, на додаток до використання примітивного компонента «Torque», функція примусу може бути змодельована за допомогою підключення компонента «ConnectingRod» (з приєднаним компонентом «Piston») до частини «CrankPin» через частини «RevoluteJoint» і застосування граничної умови тиску на «Piston» за допомогою компонентів «EngCylPres» або «Pressure» та з'єднання «PressureConn2D». Результатом є крутний момент КШМ, прикладений до «CrankPin».

Моделювання динамічних показників двигуна MAN 8L48/60 в програмному комплексі GT-SUITE

Відповідно до параметрів прототипу та за допомогою вище описаних шаблонів деталей програми було розроблено 1D модель двигуна. (рис. 1). В шаблонах моделі задано масо-габаритні параметри деталей та їх моменти інерції. За допомогою об'єкту дослідження кінематики «CrankAnalysis» задано конфігурацію КШМ: кількість, розташування циліндрів, порядок їх роботи, напрямок обертання, тактність. На вкладках об'єкту «Analysis» вказано параметри проведення розрахунку: тип двигуна – тронковий (Type of Engine); опція визначення ВМТ за положенням кривошипа (TDC Angle Convention), режим навантаження крутним моментом (Speed or Load Specification), варіант проведення розрахунку вала на кручення, коли всі вузли колінчастого вала замінюються на обертальні ступені свободи з параметрами інерції, жорсткості та демпфування для кожного окремого компоненту (Crankshaft Analysis Option). Крім того вказано, які з розрахованих залежностей отримують графічне представлення.

Для аналізу коливальних процесів в елементах КШМ використовується шаблон «TorsFreq-Analysis». Результати, отримані від нього, можуть бути з'єднані з кластером одновимірних обертальних частин для виконання вільного та/або примусового крутильного аналізу в частотній області (гармонічного) кластера одновимірних обертальних компонентів.

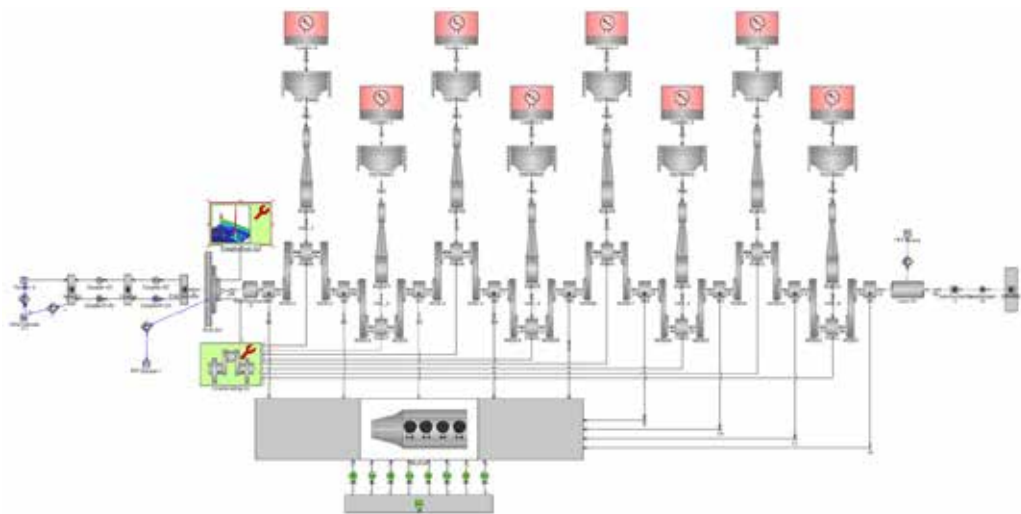


Рис. 1. 1-D модель двигуна MAN 8L48/60

Для визначення параметрів аналізу та бажаного результату для примусового частотного аналізу крутильних систем використовується об'єкт «ForcedFreqAnalysis». У цьому блоці встановлюється мінімальна та максимальна швидкості, що аналізується в розв'язанні вимушеної частоти, вказується кількість рівних кроків частоти обертання, які використовуються для поділу діапазону. Примусовий частотний аналіз виконується з кожним кроком частоти обертання, визначеним у межах діапазону. У пункті «Maximum Order Range for Analysis» визначається порогова частота для визначення резонансу. Якщо жодна комбінація частоти обертання двигуна та порядку (як визначено мінімальною швидкістю, максимальною швидкістю та максимальним замовленням для аналізу) не входить у межі, визначені для відомої резонансної частоти; буде додана нова точка швидкості, щоб резонансна частота була точно записана. Вкладка «Forcing Function Order Plots» надає можливості отримати графіки примусових функцій показників амплітуди та порядку. Для графіка буде намальовано три криві, одна з мінімальною та максимальною швидкістю, а одна з приростом швидкості, найближчим до середини діапазону. Для введення даних щодо характеру дії тиску газів на поршень використовується об'єкт «EngCylPres» (рис. 2).

Цей блок дозволяє застосувати один профіль тиску газів для всіх циліндрів одночасно, при цьому порядок роботи відповідає вказаному у «CrankAnalysis». Особливістю шаблону «EngCylPres» є те, що розрахунок циклу роботи двигуна починається з 0 градусів (ВМТ такту робочого ходу). Для контролю та стабілізації частоти обертання колінчастого вала під час проведення дослідження в програмі використовується динамометричний комплекс наведений на рис. 3. Він складається з об'єкту «Inertia», датчиків частоти обертання, PID-контролера, об'єкту навантаження крутним моментом «Torque», який можна використовувати для застосування крутного моменту до обертових механічних частин. Даний об'єкт

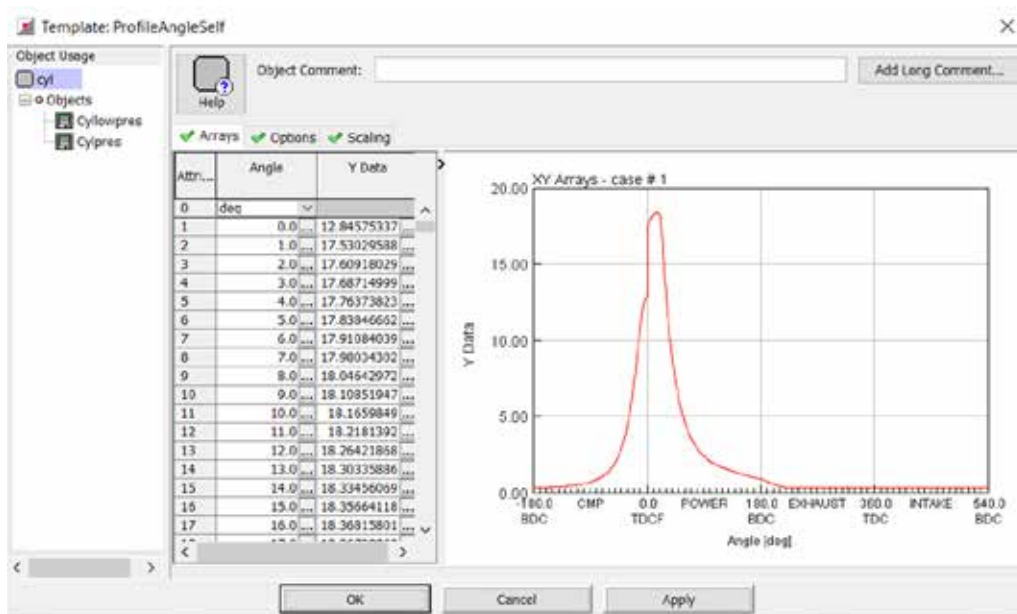


Рис. 2. Представлення індикаторної діаграми в шаблоні «EngCylPres»

є простим і має один змінний параметр (крутний момент), та він дозволяє задати прикладений крутний момент різними способами, включаючи постійний або змінний крутний момент, активацію з області керування або обчислення в моделі.

Розрахунок програмою проводиться відповідно до параметру об'єкту «Automatic Shut-Off When Steady-State» що вказує, чи слід зупинити моделювання до досягнення максимальної тривалості, визначеної в атрибутах і, що моделювання буде зупинено, якщо були виконані всі критерії конвергенції в усталеному стані. Відповідно до конфігурації двигуна порядок роботи циліндрів 1-3-2-5-8-6-7-4 з інтервалом 90° повороту колінчастого вала. Розрахунок гармонічних коливань проводиться в діапазоні частоти обертання від 60% (300 хв⁻¹) до 100% (500 хв⁻¹) з інтервалом 50 хв⁻¹. Значення параметрів інерції елементів колінчастого вала колінчастого вала розраховані за допомогою методології асоціації В.І.С.Е.Р.А. [9].

Розрахунки виконувались для двох варіантів: перший – для справного двигуна, другий – для двигуна в якому порушено процес згоряння у п'ятому циліндрі. На підставі отриманих результатів проведемо аналіз характеру зміни показників при зміні технічного стану двигуна.

Для повністю справного двигуна характер протікання крутного моменту та кутових прискорень маховика та вільного кінця колінчастого валу виглядає наступним чином (рис. 4, а, б, в). Для несправного двигуна відповідні показники наведено на рис. 4, г, д, е.

З результатів розрахунку та графічного відображення частотного аналізу вимушених коливань колінчастого валу (рис. 5) видно, що основний внесок у створення

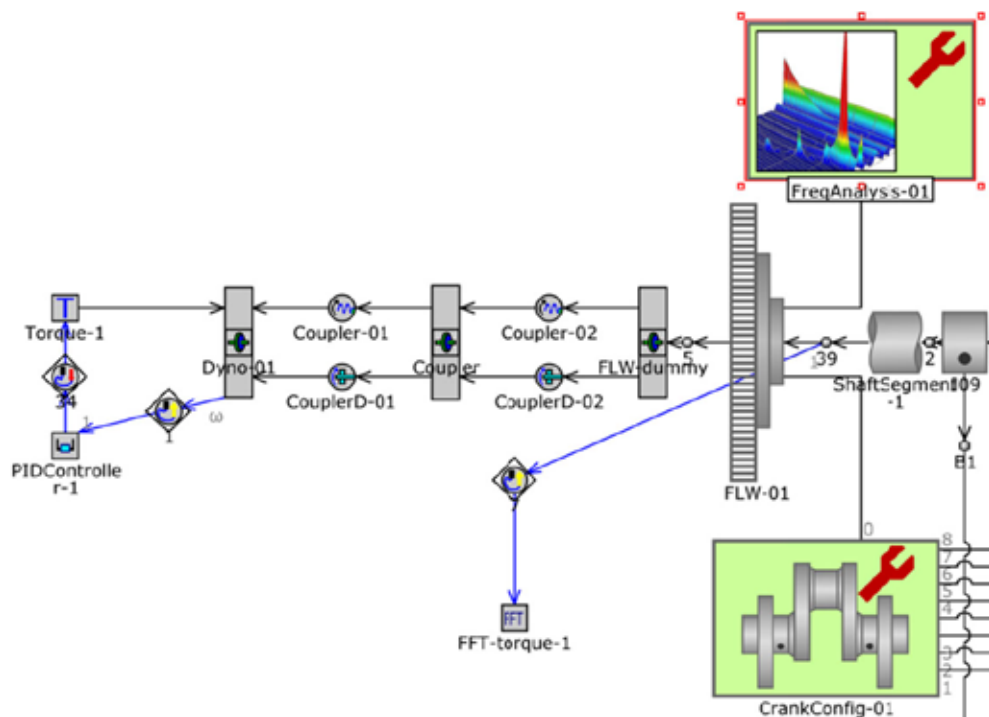


Рис. 3. Динамометричний комплекс контролю частоти обертання колінчастого валу

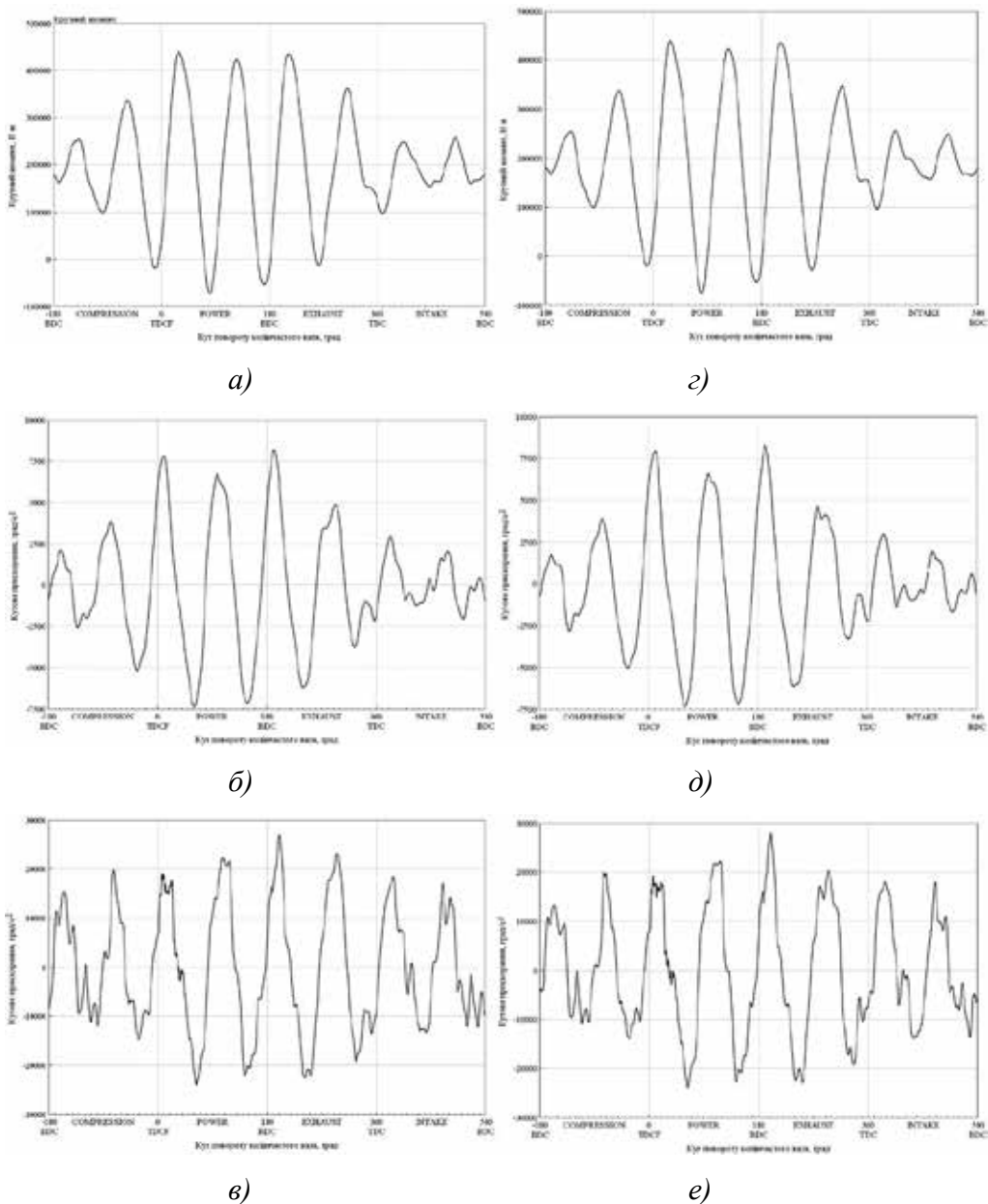


Рис. 4. Характер протікання крутного моменту та кутових прискорень маховика та вільного кінця колінчастого валу справного (а, б, в) та несправного (г, д, е) двигуна:
а, г – крутний момент; б, д – кутове прискорення маховика;
в, е – кутове прискорення вільного кінця

кутового прискорення як маховика, так і вільного кінця колінчастого валу створюють гармонічні коливання четвертого порядку. Їх величина мінімум у 8,3 рази більше за гармоніки інших порядків для маховика та у 7,8 рази більше для вільного кінця при номінальній частоті обертання справного двигуна.

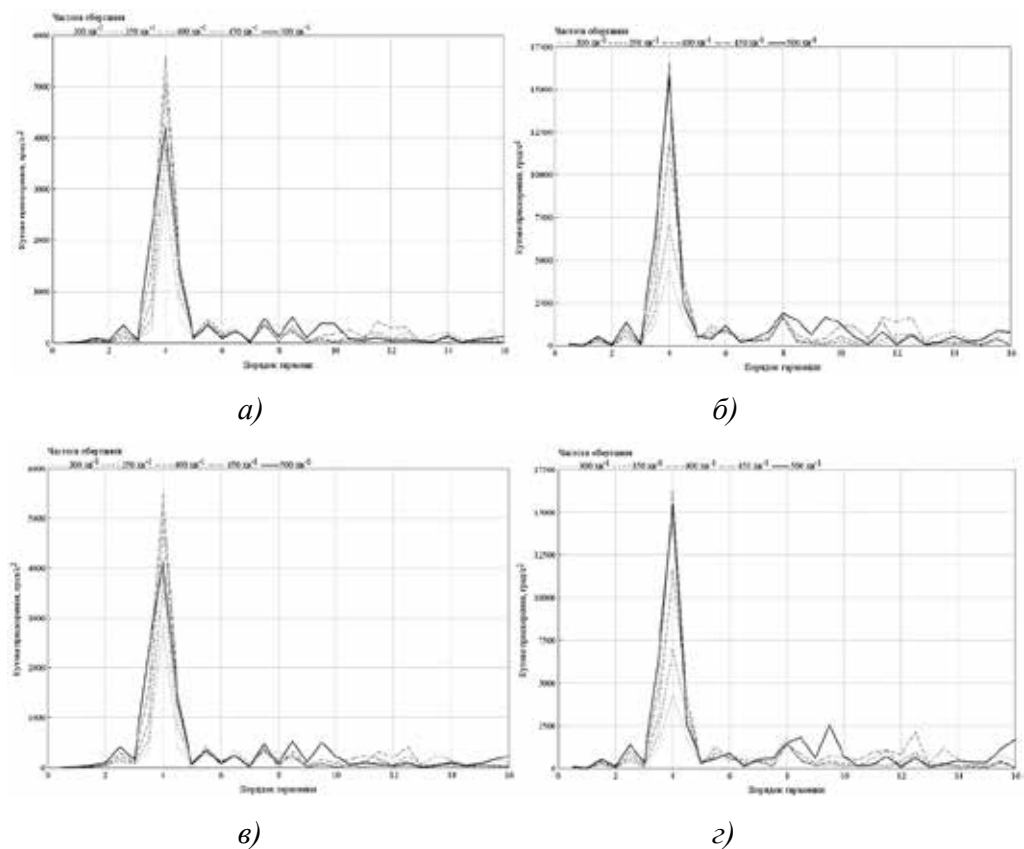


Рис. 5. Результати розрахунку та графічного відображення частотного аналізу вимушених коливань колінчастого валу:

а, б – амплітуда кутового прискорення маховика та вільного кінця справного двигуна; в, г – амплітуда кутового прискорення маховика та вільного кінця несправного двигуна

Аналіз отриманих результатів моделювання несправного двигуна вказує на те, що часина амплітуди кутового прискорення маховика від гармонічних коливань четвертого порядку у 7,9 рази більша та для вільного кінця – у 6,1 рази відповідно.

Враховуючи це, можна зробити висновок, що налаштування вимірювання кутового прискорення колінчастого валу в умовах експлуатації доцільно проводити на частотах, що відповідають цій гармоніці.

Результати відхиленя крутного моменту для справного та несправного двигунів представлено на рис. 6. З графіку видно, що порушення процесу згоряння у п'ятому циліндрі провокує виникнення різниці крутного моменту в зоні робочого ходу для справного та несправного станів. Для номінальної частоти обертання максимальна амплітуда моменту складає 67124 Н·м. Такі коливання створюють значні навантаження на колінчастий вал двигуна, що в свою чергу може призвести до його пошкодження або руйнування. Враховуючи те, що варіювання крутного моменту обумовлює відповідні зміни кутової швидкості, виникає різниці кутових прискорень маховика та вільного кінця (рис. 7, 8). Таким чином, при номінальній частоті обертання максимальна різниця кутових прискорень маховика справного

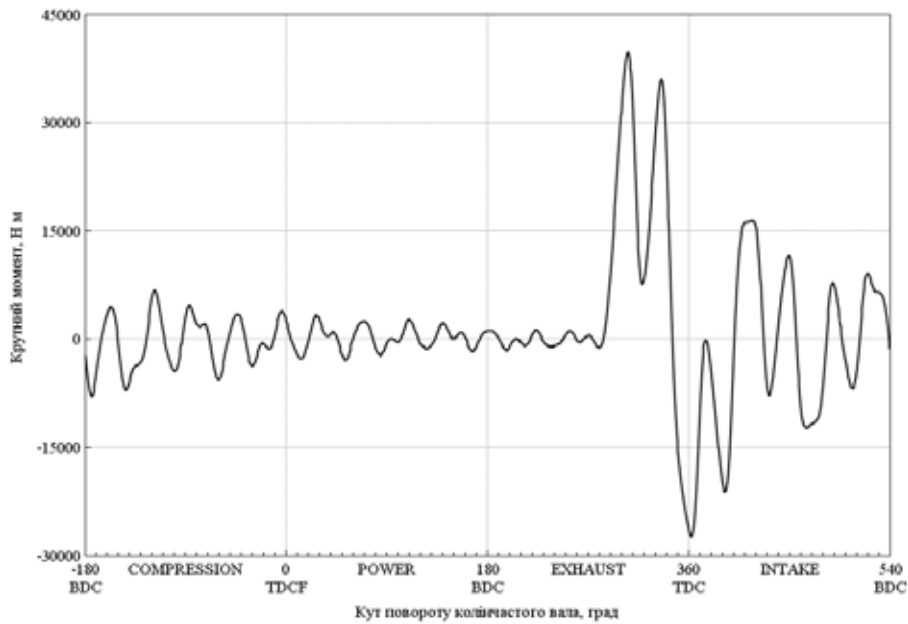


Рис. 6. Різниця крутного моменту справного та несправного двигуна

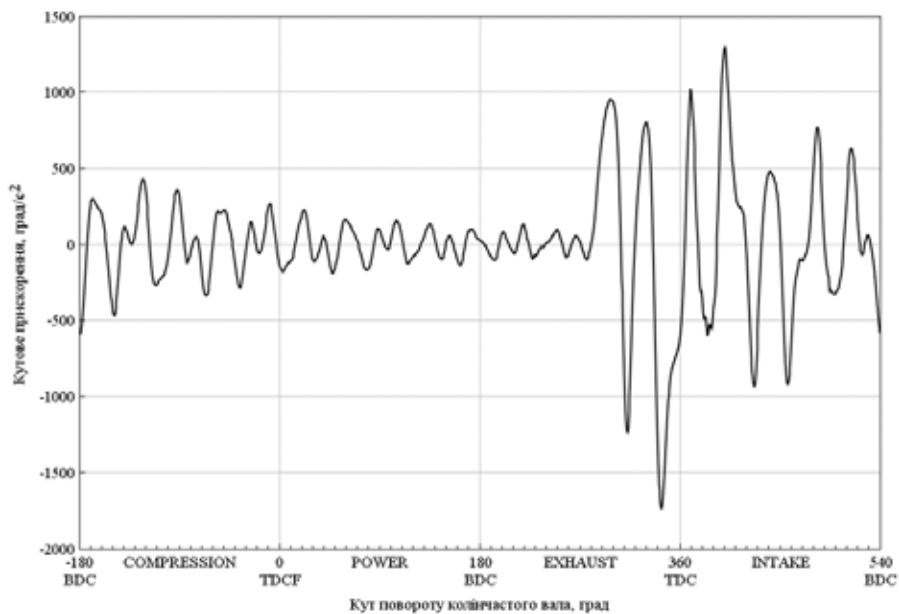


Рис. 7. Різниця кутових прискорень маховика справного та несправного двигуна

та несправного двигуна виникає на такті робочого ходу п'ятого циліндра та складає зі сторони маховика 3033 град/с^2 та для вільного кінця – 20652 рад/с^2 . Ці показники можна використовувати в якості діагностичного параметру протікання робочого процесу у двигуні. В комбінації з застосуванням фільтрації сигналу за частотами, що відповідають гармоніці четвертого порядку, можливо підвищити точність діагностування.

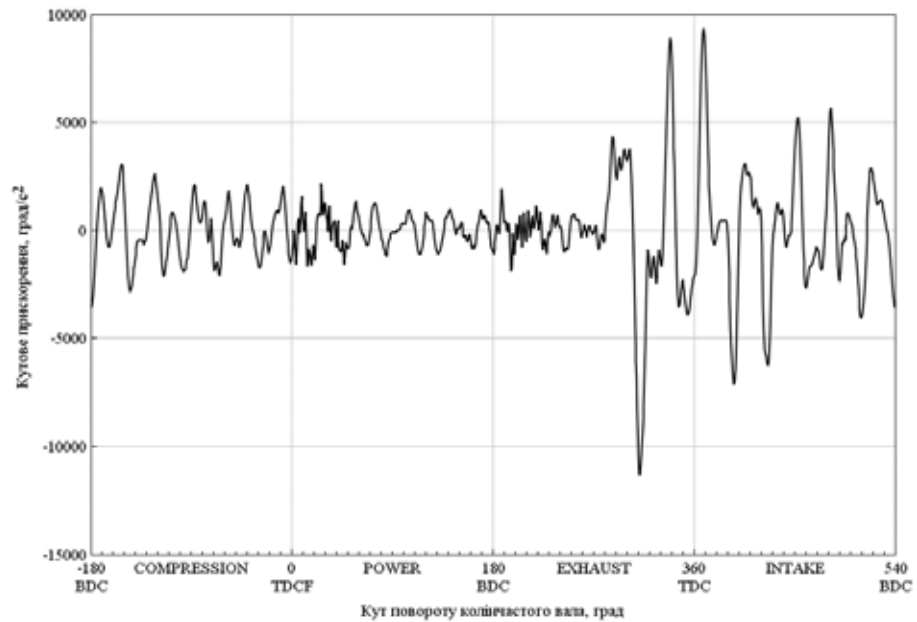


Рис. 8. Різниця куткових прискорень вільного кінця справного та несправного двигуна

Висновки. Враховуючи представлені результати, можна стверджувати, що за показниками крутильних коливань динамічної системи ДВЗ можливо здійснювати ефективний моніторинг та діагностування протікання робочих процесів в кожному окремому циліндрі. Комп'ютерне моделювання динамічних процесів в КШМ надає можливості визначити головні параметри, за якими можливо виявити порушення справного стану дизеля. Отримані результати куткових прискорень колінчастого валу двигуна СОД MAN 8L48/60 вказують на те, що в разі порушення процесу згоряння в одному з циліндрів різниця куткових прискорень на маховику складає 3033 рад/с^2 , на вільному кінці – 20652 рад/с^2 для номінального режиму навантаження. Встановлено, що головний вплив гармонічних коливань елементів на значення величин куткових прискорень колінчастого валу здійснюють гармонічні коливання четвертого порядку, що перевищують інші порядки на 6 і більше разів. Таким чином, підтверджена ефективність даного методу дослідження вказує на необхідність проведення подальших досліджень впливу основних несправностей СОД, що призводять до порушення протікання робочого процесу в кожному окремому циліндрі та розробка вимог до діагностичного обладнання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Matyja T., Łazarz B. Modeling the coupled flexural and torsional vibrations in rotating machines in transient states. *Journal of Vibroengineering*. 2014. Volume 16(4). pp. 1911–1924.
2. Pasricha M.S. Effect of the gas forces on parametrically excited torsional vibrations of reciprocating engines. *Journal of Ship Research*. 2001. Volume 45(4). pp. 262–268.

3. Johnston P.R., Shusto L.M. Analysis of diesel engine crankshaft torsional vibrations. *SAE Spec. Pub., presented at SAE Government / Industry Meeting and Exposition*, Washington, DC, USA. May 18–21 1987. pp. 21–26.
4. Iwamoto S., Wakabayashi, K. A study on the damping characteristics of torsional vibration in diesel engines (Part I). *Journal of the marine engineering society in Japan*. 1985. Volume 19. pp. 34–39.
5. Song X.G., Song T.X., Xue D.X., Li B.Z. Progressive torsional-axial continued vibrations in crankshaft systems: a phenomenon of coupled vibration. *13th Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise: Rotating Machinery and Vehicle Dynamics*, Miami, Florida, USA. September 22–25, 1991. pp. 319–323.
6. Wang Y., Lim T.C. Prediction of torsional damping coefficients in reciprocating engine. *Journal of Sound and Vibration*. 2000. Volume 238(4). – pp. 710–719.
7. Tsitsilonis K-M., Theotokatos G., Xiros N., Habens M. Systematic investigation of a large two-stroke engine crankshaft dynamics model. *Energies*. 2020. Volume 13. pp. 2486-2514.
8. Liu E., Amaratunga G., Collings N., Soliman A. An Experimental Study on Engine Dynamics Model Based In-Cylinder Pressure Estimation. *SAE Technical Papers*. SAE International: Warrendale, PA, USA. – 2012, doi:10.4271 /2012-01-0896.
9. Nestrorides E.J. A Handbook on Torsional Vibration. *Cambridge University Press: British Internal Combustion Engine Research Association (B.I.C.E.R.A)*, 1958. 694 p.

REFERENCES

1. Matyja T., Łazarz B. (2014) Modeling the coupled flexural and torsional vibrations in rotating machines in transient states. *Journal of Vibroengineering*, 16(4), 1911–1924.
2. Pasricha M.S. (2001) Effect of the gas forces on parametrically excited torsional vibrations of reciprocating engines. *Journal of Ship Research*, 45(4), 262–268.
3. Johnston P.R., Shusto L.M. (May 18–21 1987) Analysis of diesel engine crankshaft torsional vibrations. *SAE Spec. Pub., presented at SAE Government / Industry Meeting and Exposition*, Washington, DC, USA, 21–26.
4. Iwamoto S., Wakabayashi, K. (1985) A study on the damping characteristics of torsional vibration in diesel engines (Part I). *Journal of the marine engineering society in Japan*, 19, 34–39.
5. Song X.G., Song T.X., Xue D.X., Li B.Z. (September 22–25, 1991) Progressive torsional-axial continued vibrations in crankshaft systems: a phenomenon of coupled vibration. *13th Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise: Rotating Machinery and Vehicle Dynamics*, Miami, Florida, USA, 319–323.

6. Wang Y., Lim T.C. (2000) Prediction of torsional damping coefficients in reciprocating engine. *Journal of Sound and Vibration*, 238(4), 710–719.
7. Tsitsilonis K.-M., Theotokatos G., Xiros N., Habens M. (2020) Systematic investigation of a large two-stroke engine crankshaft dynamics model. *Energies*, 13, 2486–2514.
8. Liu E., Amaratunga G., Collings N., Soliman A. (2012) An Experimental Study on Engine Dynamics Model Based In-Cylinder Pressure Estimation. *SAE Technical Papers*, doi:10.4271 /2012-01-0896.
9. Nestrerides E.J. (1958) A Handbook on Torsional Vibration. *Cambridge University Press: British Internal Combustion Engine Research Association (B.I.C.E.R.A)*, 694.

ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ СУДНА

А.І. Головань¹, І.В. Грицук²

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

²д.т.н., професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок,
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-7065-6820

Анотація

Вступ. У статті розглядаються сучасні проблеми дослідження ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден. Комплексні способи гарантування необхідної ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден складаються з сукупності заходів щодо оцінки, підвищення і контролю надійності, точності, працездатності, якості функціонування та інших експлуатаційних характеристик вантажних суден та наявних суднових технічних засобів. Комплексні способи гарантування реалізуються як у сфері розробки і виробництва вантажних суден, так і безпосередньо в процесі їх експлуатації судноплавною компанією. Комплексне використання методів підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден відкриває шляхи для суттєвого підвищення надійності і якості роботи функціональних систем вантажного судна. Основу цих методів складає кількісна оцінка ефективності систем технічного обслуговування – інструмент, що дозволяє оцінити ефективність виконаних дій щодо забезпечення необхідної надійності і якості роботи засобів морського транспорту. Проведений аналіз попередніх досліджень і публікацій вказує на відсутність єдиного методологічного підходу визначення показників ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, який би надавав можливість враховувати структуру і періодичність технічного обслуговування, вид експлуатаційного контролю, глибину відновлення і зовнішній прояв відмов. **Метою** статті є розгляд найбільш характерних з опублікованих математичних моделей технічного обслуговування, виявлення загальних рис розглянутих моделей і аналіз найбільш характерних математичних моделей технічного обслуговування з метою пошуку єдиного методологічного підходу визначення показників ефективності систем технічного обслуговування засобів морського транспорту. **Результати.** Розглянуто найбільш характерні з опублікованих математичних моделей технічного обслуговування з періодичним контролем технічного стану. Узагальнено риси представлених у цьому дослідженні математичних моделей технічного обслуговування. **Висновки.** Таким чином, кількісна оцінка рівнів ефективності систем технічного обслуговування є важливим елементом у схемі розрахунку ефективності використання вантажних

суден як комерційних транспортних засобів метою експлуатації яких є отримання максимальних прибутків при заданих високих рівнях безпеки і регулярності використання. При детальному розгляді системи технічного обслуговування в її властивостях вбачаються всі ознаки складної ергатичної системи. У теперішній час теорія дослідження складних ергатичних систем має досить розвинутий математичний апарат. Тому, для розробки методологічних основ аналізу і оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден та судових технічних засобів доцільно використовувати саме теорію дослідження складних ергатичних систем.

Ключові слова: ефективність, технічне, обслуговування, оцінювання, судно, експлуатація, СУБ, МКУБ, ІМО.

THE MAIN PRINCIPLES OF ASSESSING THE EFFICIENCY OF SHIP MAINTENANCE

A.I. Golovan¹, I.V. Gritsuk²

¹PhD (Engineering), Associate Professor of Navigation and Maritime Safety Department,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-6589-4381

²DSc (Engineering), Professor of Ship Power Plants Operation Department,
Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-7065-6820

Summary

Introduction. The article considers modern problems of researching the efficiency of the cargo ship maintenance system. Comprehensive methods of guaranteeing the required efficiency of cargo ship maintenance systems consist of a set of measures to assess, improve, and control the reliability, accuracy, efficiency, quality of operation and other operational characteristics of cargo ships and available shipboard technical means. Integrated assurance methods are implemented both in the development and production of cargo ships and directly during their operation by the shipping company. The integrated use of methods for improving the efficiency of cargo ship maintenance systems opens ways to significantly improve the reliability and quality of operation of the cargo ship's functional systems. The basis of these methods is a quantitative assessment of the effectiveness of maintenance systems - a tool that allows to evaluate the effectiveness of the actions taken to ensure the required reliability and quality of maritime transport. The analysis of previous studies and publications indicates the absence of a single methodological approach to determining the performance indicators of cargo ship maintenance systems, which would allow considering the structure and frequency of maintenance, type of operational control, depth of recovery and external manifestation of failures. The purpose of the article is to consider the most typical of the published mathematical models of maintenance, to identify the common features of the models under consideration and to analyze the most typical mathematical models of maintenance to find a single methodological approach to determining the performance indicators of maintenance systems for maritime transport. **Results.** The most characteristic of the published mathematical models of maintenance with periodic monitoring of technical condition are considered. The features of the mathematical

models of maintenance presented in this study are generalized. Conclusions. Thus, quantitative assessment of the levels of efficiency of maintenance systems is an important element in the scheme of calculating the efficiency of using cargo ships as commercial vehicles whose purpose of operation is to maximize profits at given high levels of safety and regularity of use. A detailed examination of the maintenance system reveals all the features of a complex ergatic system. At present, the theory of complex ergatic systems has a well-developed mathematical apparatus. Therefore, it is advisable to use the theory of complex ergatic systems to develop methodological foundations for analyzing and evaluating the efficiency of cargo ship maintenance systems and ship equipment.

Key words: *efficiency, technical, maintenance, assessment, ship, operation, SMS, ISM Code, IMO.*

Вступ. Комплексні способи гарантування необхідної ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден складаються з сукупності заходів щодо оцінки, підвищення і контролю надійності, точності, працездатності, якості функціонування та інших експлуатаційних характеристик вантажних суден та наявних судових технічних засобів. Комплексні способи гарантування реалізується як у сфері розробки і виробництва вантажних суден, так і безпосередньо в процесі їх експлуатації судноплавною компанією. Комплексне використання методів підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден відкриває шляхи для суттєвого підвищення надійності і якості роботи функціональних систем вантажного судна. Основу цих методів складає кількісна оцінка ефективності систем технічного обслуговування – інструмент, що дозволяє оцінити ефективність виконаних дій щодо забезпечення необхідної надійності і якості роботи засобів морського транспорту.

Постановка проблеми. Під ефективністю системи технічного обслуговування прийнято розуміти сукупність ознак системи технічного обслуговування, які характеризують співвідношення між матеріальними, часовими або трудовими витратами на підтримку і відновлення працездатності засобів морського транспорту і ефектом, що досягається. Ефективність систем технічного обслуговування суттєво залежить від таких системних властивостей засобів морського транспорту як: безвідмовність, ремонтпридатність і довговічність, а також від імовірності результатів і тривалості експлуатаційного контролю. Але існує суттєва розбіжність між показниками ефективності систем технічного обслуговування засобів морського транспорту що визначені в науковій літературі і тими, що використовуються в судноплавних компаніях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Поданий короткий аналіз найбільш характерних математичних моделей технічного обслуговування [1–30] вказує на відсутність єдиного методологічного підходу визначення показників ефективності систем технічного обслуговування засобів морського транспорту, який би надавав можливість враховувати структуру і періодичність технічного обслуговування, вид експлуатаційного контролю, глибину відновлення і зовнішній прояв відмов.

Формулювання цілей статті. Метою статті є розгляд найбільш характерних з опублікованих математичних моделей технічного обслуговування, виявлення загальних рис розглянутих моделей і аналіз найбільш характерних математичних

моделей технічного обслуговування з метою пошуку єдиного методологічного підходу визначення показників ефективності систем технічного обслуговування засобів морського транспорту.

Виклад основного матеріалу.

До показників ефективності систем технічного обслуговування засобів морського транспорту що визначені в науковій літературі найбільш часто відносять наступні показники імовірності і тривалості експлуатаційного контролю, безвідмовності, ремонтпридатності і довговічності засобів морського транспорту, а саме:

$F(t)$ – функція яка характеризує напрацювання до відмови;

t_r – тривалість відновлювальних робіт;

M – середній ресурс;

$r(t)$ і $\mu(t)$ – умовні імовірності «помилкової відмови» і «невиявленої відмови» при контролі технічного стану в момент t ;

t_c – тривалість контролю технічного стану.

Класичні та сучасні публікації в області математичного моделювання процесів технічного обслуговування засобів морського транспорту присвячено задачам пошуку, за обраним критерієм, оптимальних проміжків часу для проведення технічного обслуговування. У 1959 і 1960 роках Барлоу і Хантер опублікували дві статті на тему «Математичні моделі для надійності систем» [1, 2], в яких оптимальні проміжки часу для проведення технічного обслуговування визначаються з умови мінімізації середніх експлуатаційних витрат:

$$R = \sum_{i=0}^{\infty} \int_{t_i}^{t_{i+1}} [C_c t_c (i+1) + Z(t_{i+1} - \theta)] dF(\theta) + C_r t_r, \quad (1)$$

де C_c – середні витрати в одиницю часу на роботи по контролю технічного стану;

C_r – середні витрати в одиницю часу на відновлювальні роботи;

t_r – тривалість відновлювальних робіт; t_c – тривалість контролю технічного стану; Z – середній збиток в одиницю часу через перебування засобу морського транспорту у стані прихованої відмови; θ – момент відмови засобу морського транспорту; t_i – момент проведення технічного обслуговування. В формулі (1) передбачається, що умовні імовірності «помилкової відмови» – $r(t)$ і «невиявленої відмови» – $\mu(t)$ при контролі технічного стану дорівнюють нулю $\gamma(t) = \mu(t) = 0$, $M = \infty$ і відмови засобу морського транспорту виявляються тільки під час технічного обслуговування.

Майже через 50 років, після Барлоу і Хантера у 2008 році, Епштейн та Вайсман продовжили роботу за цією тематикою та опублікували статтю також на тему «Математичні моделі для надійності систем» [3], в якій приведена формула для розрахунку середніх експлуатаційних витрат при експоненціальному законі розподілу напрацювання до відмови і $t_i = i\tau$:

$$R = \frac{C_c t_c + Z\tau}{1 - e^{-\lambda\tau}} - \frac{Z}{\lambda} + C_r t_r, \quad (2)$$

де τ – періодичність технічного обслуговування; λ – інтенсивність відмов засобів морського транспорту. З формули (2) неважко отримаємо формулу (3) для

розрахунку коефіцієнта готовності при ідеальній системі технічного обслуговування:

$$A_R = \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{\lambda[\tau + t_r(1 - e^{-\lambda\tau})]}, \quad (3)$$

Фітч у статті на тему «Технологія технічного обслуговування» [4] отримав функцію визначення експлуатаційних витрат з урахуванням помилок контролю у наступному вигляді:

$$C_\theta = \begin{cases} \gamma \sum_{m=1}^i \omega^{m-1}(mc + s) + \chi\omega^i, & \text{коли } t_i < \theta \leq t_{i+1} \\ \sum_{i=1}^n \omega^{i-1}\chi(ic + s) + \omega^n(nc + Z(M - \theta)), & \text{коли } t_n < \theta \leq M, \\ \sum_{i=1}^n \omega^{i-1}\chi(ic + s) + nc\omega^n, & \text{коли } \theta > M \end{cases} \quad (4)$$

де $c = C_c t_c$; n – число контрольних операцій всередині інтервалу (θ, T) ; $\chi = (1 - \mu) \sum_{m=i+1}^n \mu^{m-i-1}(mc + Z(t_m - \theta)) + \mu^{n-i}(nc + Z(M - \theta))$; s – штраф за визнання засобу морського транспорту неприцездатним тоді, як він є працездатним; M – середній ресурс; $\omega = 1 - \gamma$. Формула (4) отримана з наступних припущень – імовірності "помилкової відмови" і "невиявленої відмови" не залежать від напрацювання засобу морського транспорту і результатів попереднього технічного обслуговування. В статті авторства Фітча [5] показано, що дані допущення справедливі тільки в тому випадку, коли закон розподілу напрацювання до відмови є експоненціальним, математичні очікування і дисперсія похибки виміру кожного з контрольованих параметрів не залежать від напрацювання.

В роботі Гарланда та Стейнера [6] отримана формула для коефіцієнту готовності засобів морського транспорту з періодичним контролем технічного стану при експоненціальному законі розподілу напрацювання до відмови:

$$A_r = \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{(1 - e^{-\lambda\tau})\left(e^{-\lambda\tau} + \lambda\tau\frac{1}{\varpi}\right) + \lambda t_c \left[1 + \frac{1}{\varpi}(1 - e^{-\lambda\tau})\right] + \lambda t_r[1 - \omega e^{-\lambda\tau}]}, \quad (5)$$

де $\omega = 1 - \lambda$; $\varpi = 1 - \mu$.

Якщо по аналогії з формулою (1) припустити що умовні імовірності «помилкової відмови» – $\gamma(t)$ і «невиявленої відмови» – $\mu(t)$ при контролі технічного стану дорівнюють нулю $\gamma(t) = \mu(t) = 0$, то отримуємо формулу (6) для розрахунку коефіцієнту готовності при ідеальному технічному обслуговуванні:

$$A_R = \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{e^{-\lambda\tau}(1 - e^{-\lambda\tau}) + \lambda t_c + \lambda[\tau + t_r(1 - e^{-\lambda\tau})]}, \quad (6)$$

В роботі Моблі [7] приведені наступні вираження для розрахунку коефіцієнту готовності засобів морського транспорту непостійного використання, або таких, які знаходяться на збереженні:

$$A_r = \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{\lambda \left((\tau + t_c + \gamma_r) q e^{-\lambda\tau} + \left[(\tau + t_r) \frac{1}{1 - \mu} + t_r \right] \frac{1}{1 - \alpha} (1 - q e^{-\lambda\tau}) \right)}, \quad (7)$$

де α – імовірність того що відновлення не завершено; q – імовірність безвідмовної роботи засобів морського транспорту до моменту їх технічного обслуговування.

В роботі Фітча [8] визначена стратегія обслуговування засобів морського транспорту, що зберігається на інтервалі ресурсу (M, θ) . Функція експлуатаційних витрат має вид:

$$C(\theta) = \begin{cases} \varpi(i+1)c + \varpi Z(t_{i+1} - \theta) + \chi, & \text{коли } t_i < \theta \leq t_{i+1} \\ nc + Z(M - \theta), & \text{коли } t_n < \theta \leq M \\ nc, & \text{коли } \theta > M \end{cases}, \quad (8)$$

де $\chi = (1 - \mu) \sum_{m=i-1}^{n-1} \mu^{m-i} ((m+1)c + Z(t_{m+1} - \theta)) + \mu^{n-i} (nc + \varpi = 1 - \mu)$.

Формулу (9) для розрахунку коефіцієнту готовності засобів морського транспорту з періодичним контролем технічного стану отримано в роботах Гірджара, Шеффера, Бібе, Гайтнера і Блока [9, 10, 11]:

$$A_R = \frac{t_1(1 - \mu)(1 - P_s(\tau))}{\tau + t_2(1 - P_{ms}(\tau)) + (\gamma P_{ms}(\tau) - \mu t_2(1 - P_s(\tau))) + 2t_4 t_5(1 - P_s(\tau)) + t_6} \quad (9)$$

де $P_{ms}(\tau)$ і $P_s(\tau)$ – імовірності того, що в засобі морського транспорту і засобі контролю не виникає жодного дефекту протягом напрацювання M відповідно; $t_1 \dots t_6$ – середні тривалості безвідмовної роботи засобу морського транспорту, відновлення засобу морського транспорту, відновлення засобу контролю, самоконтролю, технічного обслуговування засобу морського транспорту відповідно.

Середні експлуатаційні витрати пов'язані з технічним обслуговуванням засобів морського транспорту і з втратами внаслідок прихованих відмов визначені в роботі Ленахена [12]:

$$R = \sum_{i=0}^{\infty} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \left[\int_0^{t_{i+1}-t} (ic + Zy) dG(y) + [c(i+1) + Z(t_{i+1} - t)] \bar{G}(t_{i+1} - t) \right] dF(t), \quad (10)$$

де $\bar{G}(t) = 1 - G(y)$ – функція розподілу часу прояву відмови. Умови за яких отримана формула (10) – $\gamma(t) = \mu(t) = 0$ і $M - \infty$.

Показник ефективності запропонований в роботі Уїлмотта і Маккарті [13] отриманий на основі прогнозування технічного стану засобів морського транспорту:

$$E(\tau) = \frac{W(\tau)}{C_i(\tau)}, \quad (11)$$

де $W(\tau)$ – користь у середньому напрацюванні засобів морського транспорту за рахунок попередження відмов; $C_i(\tau)$ – середні витрати на прогнозування технічного стану, яке здійснюється з періодичністю τ . Недолік цього показника ефективності полягає в тому, що він не враховує характеристик ремонтпридатності

і довговічності засобів морського транспорту, а також імовірностей здійснення помилок у процесі прогнозування технічного стану.

Показник ефективності системи технічного обслуговування з тестовим контролем запропонований в роботі Майєра і ЛеФрансуа [14] у наступному вигляді:

$$E(t) = \frac{(1 - \chi(t_0))P(t)}{(1 - \chi(t_0))P(t_0) + \mu(t_0)(1 - P(t_0))}, \text{ коли } t \geq t_0 \quad (12)$$

де $P(t)$ – імовірність безвідмовної роботи протягом напрацювання t , t_0 – момент проведення технічного обслуговування. Показник ефективності 12 не враховує факту багаторазового проведення технічного обслуговування засобів морського транспорту в процесі експлуатації.

В роботі Хольнагеля [15] розглянута трирівнева стратегія технічного обслуговування засобів морського транспорту і визначені рекурентні моделі знаходження імовірностей експлуатації суден із відмовами. Математична модель побудована при тих же граничних умовах про характер поведінки показників імовірності, що і в роботі Фітча на тему «Технологія технічного обслуговування» [4].

В статті Міловановича і Папіча [16] запропоновано ряд математичних моделей управління експлуатаційною надійністю засобів морського транспорту, які дозволяють виконувати аналіз впливу багатоетапного технічного обслуговування на характеристики безвідмовності засобів морського транспорту. В представлених моделях систем технічного обслуговування регенерація стану контрольованої частини судна виконується незалежно від результатів контролю його технічного стану, а характеристики імовірності цього контролю в представлених моделях не враховуються.

Моделі з використанням напівмарківських процесів для розрахунку параметрів потоку відмов і коефіцієнту готовності при різних стратегіях контролю технічного стану засобів морського транспорту представлені в роботі Грабського [17]. Представлені залежності для розрахунку коефіцієнту готовності не враховують характеристик імовірності результатів контрольних операцій.

Математичні моделі для розрахунку коефіцієнту готовності засобів морського транспорту з періодичним контролем технічного стану представлені в роботах Кістера і Хокінса [18, 19, 20, 21]. У вказаних моделях застосовано припущення ідеальності засобів контролю і забраковану, через відмову, систему заміняють на нову.

Формула для визначення імовірність працездатності засобів морського транспорту у будь-який момент часу Δt після технічного обслуговування n отримана в роботі Веласко-Галлего та Лазакіса [22] для однорідного марківського процесу контролю і відновлення працездатності, і має вид:

$$P(t_n + \Delta t) = \prod_{i=1}^s P_i(t_n) P_{i\sigma}(\Delta t) \prod_{b=s+1}^S P_b(0) P_{b\sigma}(t_n + \Delta t) \quad (13)$$

де $P_i(t_n)$ – імовірність працездатності за контрольованим параметром i в момент t_n ; $P_{i\sigma}(\Delta t_n)$ – імовірність безвідмовної роботи за контрольованим параметром i за час Δt після технічного обслуговування; $P_b(0)$ – імовірність початкової працездатності

за неконтрольованим параметром b ; $P_{b\sigma}(t_n + \Delta t)$ – імовірність безвідмовної роботи за неконтрольованим параметром b за час $(t_n + \Delta t)$; s – число контрольованих параметрів; S – загальне число параметрів засобу морського транспорту. $\gamma = \mu = 0$ – умови при яких було знайдено формулу (13).

Середні питомі витрати на технічне обслуговування розраховуються на основі Марківської моделі що представлена в роботі Санчес-Ергедаса, Мена-Ньето та Родріго-Муньоса [23], і має вид:

$$E(C_0) = PE_1(C_0) + (1 - P)E_2(C_0), \quad (14)$$

де P – імовірність правильного визначення стану системи; $E_1(C_0)$ – математичне очікування витрат за один крок для випадку, коли збігаються дійсний і вимірний стани системи; $E_2(C_0)$ – математичне очікування витрат через похибки засобів контролю. Формула (14) не враховує багаторазового технічного обслуговування засобів морського транспорту в процесі експлуатації і не чутлива до внесення змін у періодичність технічного обслуговування.

В роботі Каратуга [24] приведений техніко-економічний показник ефективності стратегії технічного обслуговування за станом з контролем параметрів:

$$E(t) = \frac{C_M}{P[\omega C_c + \gamma C_{cM}] + q[\mu(C_c + C_b) + \varpi C_{cM}]} \quad (15)$$

де C_M і C_c – відповідно середні витрати на технічне обслуговування і визначення технічного стану засобу морського транспорту; C_b – втрати через невиконання оперативної задачі; P – імовірність працездатного стану засобу морського транспорту; $q = 1 - P$; $\omega = 1 - \gamma$; $\varpi = 1 - \mu$; $C_c = C_c + C_M$. Цей показник надає змогу оцінювати ефективність одноразового виконання технічного обслуговування.

В статті Лазакіса, Дікіса, Міхала та Феотокатоса [25] приведена напівмарківська модель технічного обслуговування, яка дозволяє визначити середні питомі витрати на технічне обслуговування, коефіцієнт готовності і коефіцієнт технічного використання. В формулах для розрахунку показників ефективності технічного обслуговування враховані імовірності γ – «помилкової відмови» і μ – «невиявленої відмови». Математична модель побудована при тих же граничних умовах про характер поведінки показників імовірності, що і в роботі Фітча на тему «Технологія технічного обслуговування» [4].

В роботі Дуан, Лі, Ліу [26] розглянута математична модель системи технічного обслуговування з періодичним обслуговуванням. Представлена наступна формула для розрахунку коефіцієнта готовності:

$$A_R = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \prod_{m=0}^{n-1} \frac{1 - \mu_m}{\sum_{n=1}^{\infty} \left[P_n + (P_{n-1} P_n) \frac{1 - \mu_n}{1 - \mu_n} \prod_{m=0}^n (1 - \mu_m) \right] + 1} \quad (16)$$

де γ_n , μ_n – умовні імовірності «помилкової відмови» і «невиявленої відмови» при технічному обслуговуванні n ; P_n – імовірність безвідмовної роботи засобів морського транспорту протягом наробітку $n \cdot \Delta t$. Але ця формула не враховує характеристик ремонтпридатності і довговічності засобів морського транспорту. В розглянутій математичній моделі відсутня формалізація правила заміни забракованих

елементів засобів морського транспорту, що надало б змогу визначити кількісні характеристики суднових технічних засобів, які поступають на заміну.

В роботі Кандемїра і Целїка [27] досліджена стратегія проведення технічного обслуговування засобів морського транспорту, у якій виникають явні і приховані відмови. Передбачається, що відмови засобів морського транспорту можуть бути виявлені з імовірністю $1 - \mu$. При експоненціальному законі розподїлу напрацювання до відмови отримано формулу для коефіцієнта готовності в якій прийнята нульова імовірність «помилкової відмови» $\gamma_n = 0$.

В роботі Ямашїро, Сатох і Юаса [28] досліджена паралельна система, яка складається з двох блоків, відмови кожного з блоків якої можуть бути виявлені тільки під час технічного обслуговування. Виникнення відмов в кожному з блоків розподїлені за експоненціальним законом. Формула для розрахунку коефіцієнта готовності отримана з використанням математичного апарата Марківських процесів.

В [29] на відміну від [27] передбачається миттєва індикація блоку, що відмовив. А в [30] вирішена задача визначення оптимальної періодичності ТО за критерієм максимуму K_g для відновлюваної резервованої системи. В [31] побудована математична модель обслуговування резервованої системи з двох блоків, відмови якої виявляються тільки під час ТО. Вважається, що наробіток системи до відмови розподїлений за експонентним законом. В роботах [28, 29, 30] передбачається нульова імовірність «помилкової відмови» і «невиявленої відмови» $\gamma = \mu = 0$.

Висновки. Розглянуто найбільш характерні з опублікованих математичних моделей технічного обслуговування з періодичним контролем технічного стану. Загальна риса представлених у цьому дослідженні математичних моделей технічного обслуговування полягає в тому що в них не враховується структура засобів морського транспорту.

Сучасні методи оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден мають ряд суттєвих недолїків і обмежень, які знижують ефективність розроблених і проведених заходів. Вказаний факт лежить в основі того, що реальні показники ефективності багатьох систем технічного обслуговування в процесі експлуатації часто нижче від розрахункових значень і не задовольняють вимогам нормативних документів, СУБ судна і судноплавної компанії та суттєво впливають на конкурентоспроможність судна і судноплавної компанії. Така ситуація обумовлена наступними основними причинами:

По-перше, для нормування і оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, як правило, використовуються показники, запозичені з теорій надійності і експлуатації простих систем. Ці показники враховують лише факт зміни ефективності елементів системи технічного обслуговування, але не висвітлюють вплив окремих факторів на підсумковий результат функціонування систем технічного обслуговування і розглядають вантажні судна як складні технічні системи, а не як комерційні засоби транспорту.

По-друге, зараз практично відсутні науково-обґрунтовані методи оцінки ефективності систем технічного обслуговування і оцінки її впливу на ефективність функціонування вантажних суден.

По-третє, важливою особливістю сучасних вантажних суден є функціональна надлишковість більшості їхніх функціональних систем, що дозволяє вирішувати,

різними способами, задачі з технічного обслуговування поставлені перед судноплавною компанією. В свою чергу, ці способи характеризуються властивим рівнем ефективності систем технічного обслуговування.

Виходячи із зазначеного, кількісна оцінка рівнів ефективності систем технічного обслуговування є важливим елементом у схемі розрахунку ефективності використання вантажних суден як комерційних транспортних засобів метою експлуатації яких є отримання максимальних прибутків при заданих високих рівнях безпеки і регулярності використання.

При детальному розгляді системи технічного обслуговування в її властивостях вбачаються всі ознаки складної ергатичної системи. У теперішній час теорія дослідження складних ергатичних систем має досить розвинутий математичний апарат. Тому, для розробки методологічних основ аналізу і оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден та суднових технічних засобів доцільно використовувати саме теорію дослідження складних ергатичних систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. R.E. Barlow, L.C. Hunter, "Mathematical models for system reliability", Sylvania Electronic Defense Labs., Rept. No. EDL-E35, Aug 1959.
2. R.E. Barlow, L.C. Hunter, "Mathematical models for system reliability, part II", The Sylvania Technologist, vol. 13, 1960, pp. 55-65.
3. Epstein, B. J., & Weissman, I. (2008). Mathematical Models for Systems Reliability. <https://doi.org/10.1201/9781420080834>
4. Fitch, E. (1992). Maintenance Technology. Elsevier eBooks, 1–18. <https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-166-3.50004-4>
5. Fitch, E. (1992). Wear Stability. Elsevier eBooks, 217–259. <https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-166-3.50011-1>
6. Garland, D., & Stainer, F. (1970). Modern Electronic Maintenance Principles: FAULT-FINDING GUIDES. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-014188-6.50015-0>
7. Mobley, R.K. (2004). Maintenance Fundamentals (Second Edition): Planning and Scheduling. <https://doi.org/10.1016/b978-075067798-1/50025-x>
8. Fitch, E. (1992). Proactive Maintenance for Mechanical Systems: The Proactive Approach. In Elsevier eBooks (pp. 287–317). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-166-3.50013-5>
9. Girdhar, P., & Scheffer, C. (2004). Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance: Machinery fault diagnosis using vibration analysis. In Elsevier eBooks (pp. 89–133). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-075066275-8/50005-9>
10. Beebe, R. S. (2004). Predictive Maintenance of Pumps Using Condition Monitoring: Performance analysis and its application to optimise time for overhaul. In Elsevier eBooks (pp. 56–71). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-185617408-4/50004-8>
11. Geitner, F. K., & Bloch, H. P. (2012). Machinery Failure Analysis and Troubleshooting: The “Seven Cause Category Approach” to Root-Cause

- Failure Analysis. In Elsevier eBooks. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-386045-3.00009-x>
12. Lenahan, T. (2005). Turnaround, Shutdown and Outage Management. Effective Planning and Step-by-Step Execution of Planned Maintenance Operations: Cost control. <https://doi.org/10.1016/b978-075066787-6/50010-9>
 13. Willmott, P., & McCarthy, D. D. (2001). Total Productivity Maintenance (Second Edition): Assessing the true costs and benefits of TPM. In Elsevier eBooks (pp. 17–22). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-075064447-1/50005-9>
 14. Mayer, P., & LeFrancois, D. (1991). SURFWEAR-EXPERT SYSTEM FOR ENGINEERING OF WEAR RESISTANT SURFACES AND FOR WEAR PROBLEM DIAGNOSIS. Proceedings of Metallurgical Society of Canadian Institute of Mining and Metallurgy. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-041441-6.50029-1>
 15. Hollnagel, E. (1998). Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM): Qualitative Performance Prediction. In Elsevier eBooks (pp. 216–233). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-008042848-2/50008-7>
 16. Milovanovic, Z., Papić, L. R., Milovanovic, V., Milovanović, S., Dumonjić-Milovanović, S., & Branković, D. (2021). Methods of modeling the maintenance of a steam turbine based on condition assessment. Elsevier eBooks, 135–177. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819582-6.00007-1>
 17. Grabski, F. (2015). Semi-Markov Processes: Applications in System Reliability and Maintenance. In Elsevier eBooks. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/c2013-0-14260-2>
 18. Kister, T.C., & Hawkins, B.L. (2006). Performing the Maintenance Scheduling Function. Maintenance Planning and Scheduling, 189–210. <https://doi.org/10.1016/b978-075067832-2/50009-4>
 19. Kister, T.C., & Hawkins, B.L. (2006). Special Case: Maintenance Planning and Scheduling for Maintenance Outages – The Plant Shutdown. Maintenance Planning and Scheduling. <https://doi.org/10.1016/b978-075067832-2/50010-0>
 20. Kister, T.C., & Hawkins, B.L. (2006). Metrics: Measuring Planning and Scheduling Performance. Maintenance Planning and Scheduling. <https://doi.org/10.1016/b978-075067832-2/50012-4>
 21. Kister, T.C., & Hawkins, B.L. (2006). Planning and Scheduling Fundamentals-Self-Test. Maintenance Planning and Scheduling. <https://doi.org/10.1016/b978-075067832-2/50013-6>
 22. Velasco-Gallego, C., & Lazakis, I. (2022). A real-time data-driven framework for the identification of steady states of marine machinery. Applied Ocean Research, 121, 103052. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103052>
 23. Sánchez-Herguedas, A., Mena-Nieto, A., & Rodrigo-Muñoz, F. (2021). A new analytical method to optimise the preventive maintenance interval by using a semi-Markov process and z-transform with an application to

- marine diesel engines. *Reliability Engineering and System Safety*, 207, 107394. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107394>
24. Karatuğ, A., & Arslanoğlu, Y. (2022). Development of condition-based maintenance strategy for fault diagnosis for ship engine systems. *Ocean Engineering*, 256, 111515. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111515>
25. Lazakis, I., Dikis, K., Michala, A. L., & Theotokatos, G. (2016). Advanced Ship Systems Condition Monitoring for Enhanced Inspection, Maintenance and Decision Making in Ship Operations. *Transportation Research Procedia*, 14, 1679–1688. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.133>
26. Duan, C., Li, Z., & Liu, F. (2020). Condition-based maintenance for ship pumps subject to competing risks under stochastic maintenance quality. *Ocean Engineering*, 218, 108180. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108180>
27. Kandemir, C., & Celik, M. (2021). Determining the error producing conditions in marine engineering maintenance and operations through HFACS-MMO. *Reliability Engineering and System Safety*, 206, 107308. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107308>
28. Yamashiro, M., Satoh, M., & Yuasa, Y. (1992). Parallel-series and series-parallel redundant systems consisting of units having two kinds of failure rates. *Microelectronics Reliability*, 32(5), 611–613. [https://doi.org/10.1016/0026-2714\(92\)90615-r](https://doi.org/10.1016/0026-2714(92)90615-r)
29. Kandemir, C., Celik, M., Akyuz, E., & Aydin, O. (2019). Application of human reliability analysis to repair & maintenance operations on-board ships: The case of HFO purifier overhauling. *Applied Ocean Research*, 88, 317–325. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.04.019>
30. Akyuz, E., Akgun, I., & Celik, M. (2016). A fuzzy failure mode and effects approach to analyse concentrated inspection campaigns on board ships. *Maritime Policy*, 43(7), 887–908. <https://doi.org/10.1080/03088839.2016.1173737>

REFERENCES

1. R.E. Barlow, L.C. Hunter, "Mathematical models for system reliability", *Sylvania Electronic Defense Labs., Rept. No. EDL-E35*, Aug 1959.
2. R.E. Barlow, L.C. Hunter, "Mathematical models for system reliability, part II", *The Sylvania Technologist*, vol. 13, 1960, pp. 55-65.
3. Epstein, B. J., & Weissman, I. (2008). *Mathematical Models for Systems Reliability*. <https://doi.org/10.1201/9781420080834>
4. Fitch, E. (1992). *Maintenance Technology*. Elsevier EBooks, 1–18. <https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-166-3.50004-4>
5. Fitch, E. (1992). *Wear Stability*. Elsevier EBooks, 217–259. <https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-166-3.50011-1>
6. Garland, D., & Stainer, F. (1970). *Modern Electronic Maintenance Principles: FAULT-FINDING GUIDES*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-014188-6.50015-0>

7. Mobley, R. K. (2004). *Maintenance Fundamentals (Second Edition): Planning and Scheduling*. <https://doi.org/10.1016/b978-075067798-1/50025-x>
8. Fitch, E. (1992). Proactive Maintenance for Mechanical Systems: The Proactive Approach. In Elsevier eBooks (pp. 287–317). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-166-3.50013-5>
9. Girdhar, P., & Scheffer, C. (2004). Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance: Machinery fault diagnosis using vibration analysis. In Elsevier eBooks (pp. 89–133). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-075066275-8/50005-9>
10. Beebe, R. S. (2004). Predictive Maintenance of Pumps Using Condition Monitoring: Performance analysis and its application to optimise time for overhaul. In Elsevier eBooks (pp. 56–71). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-185617408-4/50004-8>
11. Geitner, F. K., & Bloch, H. P. (2012). Machinery Failure Analysis and Troubleshooting: The “Seven Cause Category Approach” to Root-Cause Failure Analysis. In Elsevier eBooks. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-386045-3.00009-x>
12. Lenahan, T. (2005). Turnaround, Shutdown and Outage Management. Effective Planning and Step-by-Step Execution of Planned Maintenance Operations: Cost control. <https://doi.org/10.1016/b978-075066787-6/50010-9>
13. Willmott, P., & McCarthy, D. D. (2001). Total Productivity Maintenance (Second Edition): Assessing the true costs and benefits of TPM. In Elsevier eBooks (pp. 17–22). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-075064447-1/50005-9>
14. Mayer, P., & LeFrancois, D. (1991). SURFWEAR-EXPERT SYSTEM FOR ENGINEERING OF WEAR RESISTANT SURFACES AND FOR WEAR PROBLEM DIAGNOSIS. Proceedings of Metallurgical Society of Canadian Institute of Mining and Metallurgy. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-041441-6.50029-1>
15. Hollnagel, E. (1998). Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM): Qualitative Performance Prediction. In Elsevier eBooks (pp. 216–233). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-008042848-2/50008-7>
16. Milovanovic, Z., Papić, L. R., Milovanovic, V., Milovanović, S., Dumonjić-Milovanović, S., & Branković, D. (2021). Methods of modeling the maintenance of a steam turbine based on condition assessment. Elsevier eBooks, 135–177. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819582-6.00007-1>
17. Grabski, F. (2015). Semi-Markov Processes: Applications in System Reliability and Maintenance. In Elsevier eBooks. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/c2013-0-14260-2>
18. Kister, T. C., & Hawkins, B. L. (2006). Performing the Maintenance Scheduling Function. *Maintenance Planning and Scheduling*, 189–210. <https://doi.org/10.1016/b978-075067832-2/50009-4>
19. Kister, T. C., & Hawkins, B. L. (2006). Special Case: Maintenance Planning and Scheduling for Maintenance Outages – The Plant Shutdown.

- Maintenance Planning and Scheduling. <https://doi.org/10.1016/b978-075067832-2/50010-0>
20. Kister, T. C., & Hawkins, B. L. (2006). Metrics: Measuring Planning and Scheduling Performance. *Maintenance Planning and Scheduling*. <https://doi.org/10.1016/b978-075067832-2/50012-4>
 21. Kister, T.C., & Hawkins, B.L. (2006). Planning and Scheduling Fundamentals-Self-Test. *Maintenance Planning and Scheduling*. <https://doi.org/10.1016/b978-075067832-2/50013-6>
 22. Velasco-Gallego, C., & Lazakis, I. (2022). A real-time data-driven framework for the identification of steady states of marine machinery. *Applied Ocean Research*, 121, 103052. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103052>
 23. Sánchez-Herguedas, A., Mena-Nieto, A., & Rodrigo-Muñoz, F. (2021). A new analytical method to optimise the preventive maintenance interval by using a semi-Markov process and z-transform with an application to marine diesel engines. *Reliability Engineering and System Safety*, 207, 107394. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107394>
 24. Karatuğ, A., & Arslanoğlu, Y. (2022). Development of condition-based maintenance strategy for fault diagnosis for ship engine systems. *Ocean Engineering*, 256, 111515. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111515>
 25. Lazakis, I., Dikis, K., Michala, A. L., & Theotokatos, G. (2016). Advanced Ship Systems Condition Monitoring for Enhanced Inspection, Maintenance and Decision Making in Ship Operations. *Transportation Research Procedia*, 14, 1679–1688. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.133>
 26. Duan, C., Li, Z., & Liu, F. (2020). Condition-based maintenance for ship pumps subject to competing risks under stochastic maintenance quality. *Ocean Engineering*, 218, 108180. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108180>
 27. Kandemir, C., & Celik, M. (2021). Determining the error producing conditions in marine engineering maintenance and operations through HFACS-MMO. *Reliability Engineering and System Safety*, 206, 107308. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107308>
 28. Yamashiro, M., Satoh, M., & Yuasa, Y. (1992). Parallel-series and series-parallel redundant systems consisting of units having two kinds of failure rates. *Microelectronics Reliability*, 32(5), 611–613. [https://doi.org/10.1016/0026-2714\(92\)90615-r](https://doi.org/10.1016/0026-2714(92)90615-r)
 29. Kandemir, C., Celik, M., Akyuz, E., & Aydin, O. (2019). Application of human reliability analysis to repair & maintenance operations on-board ships: The case of HFO purifier overhauling. *Applied Ocean Research*, 88, 317–325. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.04.019>
 30. Akyuz, E., Akgun, I., & Celik, M. (2016). A fuzzy failure mode and effects approach to analyse concentrated inspection campaigns on board ships. *Maritime Policy*, 43(7), 887–908. <https://doi.org/10.1080/03088839.2016.1173737>

ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ МАНЕВРУВАННЯ ПРИ ШЛЮЗУВАННІ СУДНА

І.П. Гончарук¹, А.І. Головань², А.Ю. Піменова³

¹к.т.н., доцент кафедри судноводіння і морської безпеки,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-5306-4206

²к.т.н., доцент кафедри судноводіння і морської безпеки,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-6589-4381

³старший викладач кафедри кримінальне і адміністративне право,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-2715-394X

Анотація

Вступ. У статті розглядаються сучасні проблеми безпеки судноплавства, а також проблема дотримання безпеки маневрування при шлюзуванні судна. Досвід судноводіння та експлуатації великогабаритних суден показує, що безпека їх плавання перебуває у тісному зв'язку з характерними особливостями внутрішніх водних шляхів, серед яких слід виділити наявність гідротехнічних споруд, обмеженість габаритів, вплив течії та розвинених вітрохвильових умов. Основний вид аварійності становлять удари та навали суден на причальні стінки, та судна, що стоять біля причальної стінки. Основними причинами високої аварійності є помилки судноводіїв у виборі безпечної швидкості руху та неправильний облік впливу зовнішніх факторів на судно під час виконання маневрів. В даний час відсутні надійні залежності для розрахунку зусиль, що виникають при гідродинамічній взаємодії судна, що рухається, і гідротехнічної споруди, що не дозволяє виробити рекомендації з вибору безпечних швидкостей руху і траверзних відстаней. Існуючі аналітичні залежності щодо визначення безпечної швидкості заходу в камеру шлюзу і, як наслідок, величини осідання судна не відображають повною мірою особливості даного процесу і призводять часом до суттєвих похибок. На даний час не існує достатньо надійного методу визначення елементів маневру ухилення суден при курсових кутах менше 10 градусів, які мають місце у підхідних каналах суднопропускних споруд. Існуюча методика раціонального компонування елементів підхідних каналів не повною мірою враховує особливості руху суден за умов істотного обмеження габаритів суднового ходу. **Метою** статті є питання обґрунтування габаритів підхідних каналів до суднопропускних споруд, що покликані забезпечувати безпечне маневрування суден і знижувати до мінімуму час заходження в камеру та виходу з неї для збільшення пропускної спроможності споруди. **Результати.** Запропоновані заходи та надані рекомендації, щодо вибору найбільш оптимальних, з погляду безпеки, способів виконання маневрування при шлюзуванні судна. **Висновки.** Таким чином, аналіз щодо питання обґрунтування габаритів підхідних каналів до суднопропускних споруд, що покликані

забезпечувати безпечне маневрування суден і знижувати до мінімуму час заходження в камеру та виходу з неї для збільшення їх пропускної спроможності, показав, що вони не повною мірою враховують маневрені якості суден.

Ключові слова: безпека маневрування, судно, гідротехнічні споруди, шлюз, суднопропускні споруди.

IMPROVING THE SAFETY OF MANEUVERING DURING SHIP LOCKING

I.P. Honcharuk¹, A.I. Golovan², A.Y. Pimenova³

¹PhD (Engineering), Associate Professor of Navigation and Maritime Safety Department,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-5306-4206

²PhD (Engineering), Associate Professor of Navigation and Maritime Safety Department,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-6589-4381

³Senior Lecturer at the Department of Criminal and Administrative Law,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-2715-394X

Summary

Introduction. The article discusses the current issues of safety of navigation, as well as the problem of compliance with the safety of maneuvering when locking ships. The experience of navigation and operation of large-sized vessels shows that their navigation safety is closely related to the characteristic features of inland waterways, among which are the presence of hydraulic structures, limited dimensions, the influence of currents and developed wind and wave conditions. The main type of accidents is caused by vessel impacts and collisions with berth walls and vessels standing near the berth wall. The main reasons for the high accident rate are mistakes made by navigators in choosing a safe speed and incorrect consideration of the impact of external factors on the vessel during maneuvers. At present, there are no reliable dependencies for calculating the forces arising from the hydrodynamic interaction of a moving vessel and a hydraulic structure, which does not allow developing recommendations for choosing safe speeds and crossing distances. Existing analytical dependencies for determining the safe speed of entry into the lock chamber and, as a result, the amount of ship draft do not fully reflect the peculiarities of this process and sometimes lead to significant errors. At present, there is no sufficiently reliable method for determining the elements of ship evasive maneuvers at heading angles of less than 10 degrees, which occur in the approach channels of ship passage facilities. The existing methodology for the rational layout of approach channel elements does not fully consider the peculiarities of ship traffic under conditions of significant restrictions on the dimensions of the ship's course. **The purpose** of the article is to substantiate the dimensions of approach channels to ship passage facilities designed to ensure safe maneuvering of ships and minimize the time of entry into and exit from the chamber to increase the throughput capacity of the facility. **Results.** Measures and recommendations for choosing the most optimal, from the point of view of safety, ways of maneuvering when locking ships are proposed. **Conclusions.** Thus, the analysis of

the issue of justification of the dimensions of approach channels to ship locks, which are designed to ensure safe maneuvering of ships and minimize the time of entering and leaving the chamber to increase their throughput, showed that they do not fully consider the maneuvering qualities of ships.

Key words: *safety of maneuvering, vessel, hydraulic structures, lock, ship passage facilities.*

Вступ. Досвід судноводіння та експлуатації великогабаритних суден показує, що безпека їх плавання перебуває у тісному зв'язку з характерними особливостями внутрішніх водних шляхів, серед яких слід виділити наявність гідротехнічних споруд, обмеженість габаритів путей, вплив течії та розвинених вітрохвильових явищ, висока інтенсивність руху. У зв'язку з цим основоположним напрямом під час вивчення різних аспектів судноводіння великогабаритних суден є проблема забезпечення безпеки плавання, що передбачає досягнення оптимального співвідношення між габаритами шляху, головними розмірами судна та ефективністю засобів забезпечення керованості.

Постановка проблеми. Проблема забезпечення безпеки плавання суден при проходженні гідровузлів в теперішній час має актуальне значення. З погляду забезпечення безпеки плавання суден зони суднопропускних гідротехнічних споруд є одними з найскладніших ділянок водних шляхів. Напруженість роботи судноводія і складність керування судном на цих ділянках зумовлена необхідністю виконання значної кількості різноманітних маневрів в умовах обмеженого шляху під час руху на малих швидкостях ходу. Статистичні дані про стан аварійності показують, що кількість транспортних подій з суднами в зонах суднопропускних гідротехнічних споруд залишається досить високою і становить близько 19% від їх загальної кількості. При цьому основна частина аварій в районах гідровузлів відбувається в підхідних каналах, а також при заході в шлюз (біля 59%) і припадає на частку великогабаритних суден. Більшість транспортних подій є наслідком помилок судноводіїв у виборі безпеки швидкості руху, неврахування особливостей гідродинамічної взаємодії суден, а також вплив зовнішніх факторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

При вивченні теоретичних та практичних основ методів підвищення безпеки маневрування при шлюзованні суден встановлено, що ряд актуальних питань з організації їх роботи, аналіз стану та сучасних проблем, залишаються або недостатньо мірою дослідженими, або вимагають уточнення, узагальнення та врахування сучасних вимог щодо організації безпеки маневрування під час проходження гідровузлів. Питання про раціональне компонування підходів до суднопропускних споруд детально розглянуте в роботах [1, 4, 5, 6, 7, 8, 9] та ін. Рекомендації перелічених вище авторів, маючи схожість підходу до розв'язання задачі загалом, розходяться лише в деяких приватних питаннях. Останнім часом спостерігається підкреслене прагнення привести всі водні шляхи до єдиних умов, що забезпечують плавання однотипних суден.

Формулювання цілей статті. Метою статті є аналіз вибору раціональної схеми компонування гідровузла. Питання обґрунтування габаритів підхідних каналів до суднопропускних споруд, що покликані забезпечувати безпечне маневрування

суден і знижувати до мінімуму час заходження в камеру та виходу з неї для збільшення пропускної спроможності споруди.

Виклад основного матеріалу. Підхідні канали являють собою переважно прямолінійні ділянки з деякими розширеннями, розташовані по обидва боки від шлюзу. У них перебувають судна і склади, що прямують у вільну камеру шлюзу або очікують шлюзування біля причальної стінки. Канали зазвичай захищені від хвилювань на водосховищі та водних течій у річці розділовими стінками, які забезпечують спокійні умови відстою суден перед шлюзуванням. Основними елементами підхідних каналів є: канал із трапецеїдальним перерізом, причальна і спрямовувальна стінки для поліпшення умов заходження суден у камеру шлюзу. Напрямна стінка забезпечує плавний перехід від широкої частини каналу до камери шлюзу. Напрямна стінка може бути продовженням стіни камери шлюзу або примикати до неї під невеликим кутом. Вона дає змогу суднам і потягам підтримувати відносно високу швидкість руху під час заходу в камеру шлюзу за сильних бічних вітрів і наявності течії. При цьому значно скорочується тривалість маневрування.

Габарити основних елементів підхідного каналу розраховують, виходячи з геометричних співвідношень їх із габаритами розрахункового судна, що призначається з-поміж тих, що мають найбільші розміри за довжиною та шириною, з урахуванням обраного способу розбіжності суден у підхідному каналі (типу каналу) і числа камер шлюзу.

За даними Державної служби морського і внутрішнього водного транспорту та судноплавства України [2] стан безпеки судноплавства та аварійності на водному транспорті України (у тому числі і за її межами, але із українськими суднами), включаючи маломірні (малі) судна, за січень – червень 2022 року з наростаючим підсумком [3]. Слід зазначити, що на значне зниження аварійності на морському та внутрішньому водному транспорті пов'язане також із тимчасовим припиненням судноплавства у територіальному морі та на внутрішніх водних шляхах України через військову агресію російської федерації проти України. Починаючи з 24 лютого 2022 року, фактично розпочалась блокада морських портів на південному узбережжі України.

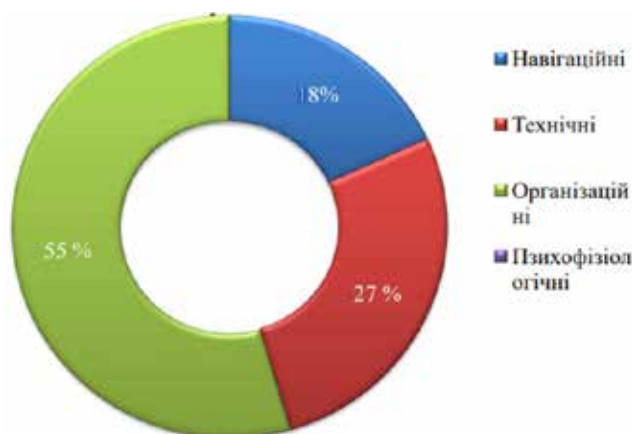


Рис. 1. Кількість випадків аварійних подій за причинами виникнення протягом січня – червня у 2022 році [3]

Дослідження, проведені раніше, дають змогу судити про те, що наявна методика розрахунку габаритів підхідних каналів загалом забезпечує безпечні умови плавання суден і составів. Однак на тих шлюзах, де за умовами розташування гідровузлів спостерігаються несприятливі гідрометеоумови необхідно деяке коригування розрахункових формул.

Так, під час визначення основних елементів підхідного каналу величину відстані $X_{укл}$, необхідної судну, що виходить із камери шлюзу, для безпечного виконання маневру ухилення доцільніше визначати за виразами (1) – (2), що враховують реальні умови маневрування:

$$\begin{aligned}\bar{X}_{укл} &= X_{укл}/L; \\ \bar{Y}_{укл} &= Y_{укл}/B\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}\bar{X}_{укл} &= \left(\frac{V-1}{V+1}\right)^{0,195} + 1,518\left(\frac{T}{H}\right)m - 2,5E\chi - 0,704\chi\bar{Y}_{укл} + \\ &+ 4,637(m)^2 - 0,03(\bar{Y}_{укл})^2\end{aligned}\quad (2)$$

При цьому величина параметра $X_{укл}$, що входить до розрахункових формул (1) – (2), визначається залежно від швидкості руху і глибини в каналі при утворенні безпечної траєкторії відстані між бортами суден, що розходяться.

Визначене в такий спосіб значення безпечної траверсної відстані впливає в підсумку і на вибір необхідної ширини підхідного каналу для забезпечення безпеки руху суден. На відміну від методики під час визначення ширини ходової смуги, яку займає судно, необхідно враховувати не тільки ширину, а й довжину судна. У разі порушення умов безпеки ширину підхідного каналу необхідно збільшити на необхідну величину.

За наявності в районі підхідного каналу ділянок із несприятливим характером течії необхідно провести додаткову перевірку керованості суден і межі безпечних швидкостей руху.

Після цього визначається величина відстані, необхідної судну для погашення інерції ходу під час проходження меж ділянки дії течії.

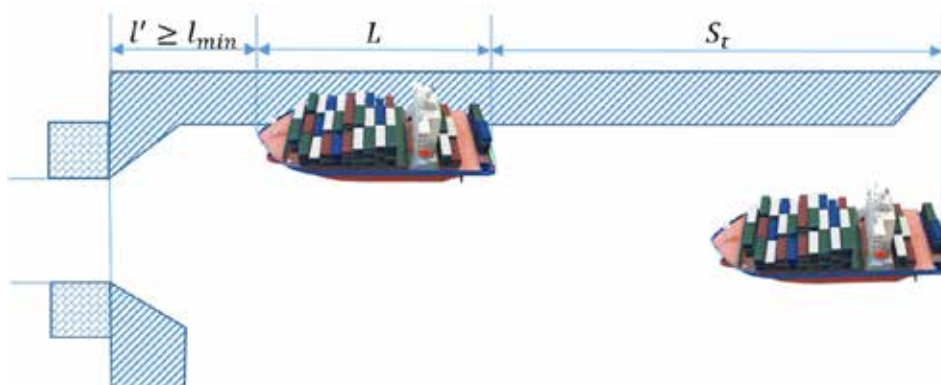


Рис. 1. Схема перевірного розрахунку довжини підхідного каналу за одностороннього руху

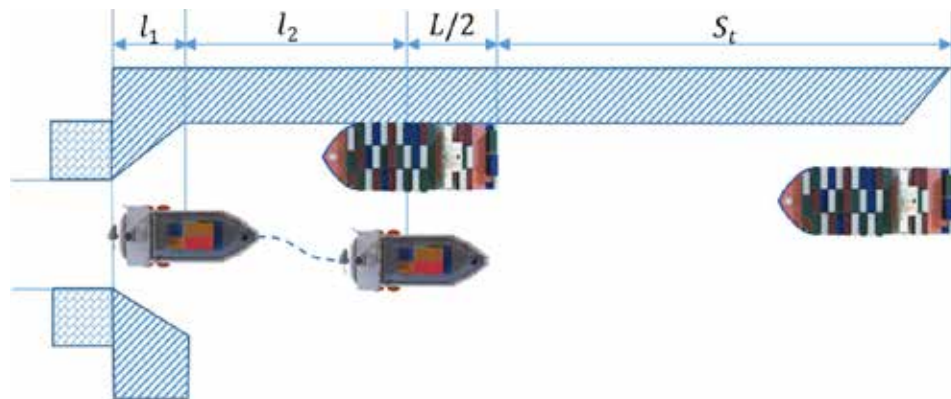


Рис. 2. Схема перевірного розрахунку довжини підхідного каналу за двостороннього руху

У підсумку визначається відстань від носової частини судна, що зупинилося біля причальної стінки, до лицьової грані голови шлюзу (рис. 2). Необхідно зазначити, що для проектних розрахунків слід вибирати максимальне значення шляху гальмування суден, що перевіряються, для заданих характері та швидкостей течії.

У разі одностороннього руху безпеку умов відстою суден біля причальної стінки слід оцінювати шляхом порівняння отриманої відстані I з величиною I_{\min} .

У разі двостороннього руху оцінку безпеки відстою суден біля причальної стінки слід здійснювати шляхом порівняння отриманої величини I з розрахунковою відстанню, необхідною судну, яке виходить із камери шлюзу, для успішного виконання маневру ухилення $X_{\text{укл}}$ (рис. 3).

У разі порушення умов безпеки довжину причальної стінки необхідно збільшити до необхідної величини.

Висновки. Таким чином, під час проведення аналізу аварійності суден встановлено, що близько 20% транспортних пригод сталося у зоні гідротехнічних споруд. Причому основна частина мала місце у підхідних каналах суднопропускних споруд та при заході в камеру шлюзу (55%). Аналіз щодо питання обґрунтування габаритів підхідних каналів до суднопропускних споруд, що покликані забезпечувати безпечне маневрування суден і знижувати до мінімуму час заходження в камеру та виходу з неї для збільшення їх пропускної спроможності, показав, що вони не повною мірою враховують маневрені якості суден.

ЛІТЕРАТУРА

1. Wang, T., & Li, T. (2022). Ship lock management and dynamic congestion toll for ships. *Ocean and Coastal Management*, 230, 106369. <https://doi.org/10.1016/j.ocesoaman.2022.106369>
2. Державна служба морського і внутрішнього водного транспорту та судноплавства України - офіційний портал. (2023). Retrieved January 15, 2023, from <https://marad.gov.ua/ua>
3. Звіт про стан безпеки судноплавства та аварійності на водному транспорті в Україні (у тому числі і за її межами, але із українськими суднами), включаючи маломірні (малі) судна, за січень – червень

- 2022 року з наростаючим підсумком. (2022, July 30). <https://marad.gov.ua/>. Retrieved January 15, 2023, from https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/Zvit_2022.pdf
4. Zheng, Q.Q., Zhang, Y., He, L.J., & Tian, H.W. (2023). Discrete multi-objective artificial bee colony algorithm for green co-scheduling problem of ship lift and ship lock. *Advanced Engineering Informatics*, 55, 101897. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.101897>
 5. Deng, Y., Sheng, D., & Liu, B. (2021). Managing ship lock congestion in an inland waterway: A bottleneck model with a service time window. *Transport Policy*, 112, 142–161. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.08.017>
 6. Liu, C., Qi, J., Chu, X., Zheng, M., & He, W. (2021). Cooperative ship formation system and control methods in the ship lock waterway. *Ocean Engineering*, 226, 108826. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108826>
 7. Xu, J., Xuan, G., Li, Y., Li, Z., Hu, Y., Jin, Y., & Huang, Y. (2016). Study on the squat of extra-large scale ship in the Three Gorges ship lock. *Ocean Engineering*, 123, 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.07.001>
 8. Bugarski, V., Bačkalić, T., & Kuzmanov, U. (2013). Fuzzy decision support system for ship lock control. *Expert Systems with Applications*, 40(10), 3953–3960. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.12.101>
 9. Wang, H.Z., & Zou, Z.J. (2014). Numerical study on hydrodynamic interaction between a berthed ship and a ship passing through a lock. *Ocean Engineering*, 88, 409–425. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.07.001>
 10. A. Golovan, I. Gritsuk, S. Rudenko, V. Saravas, A. Shakhov and O. Shumylo. Aspects of Forming the Information V2I Model of the Transport Vessel, 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2019, pp. 390–393, doi: 10.1109/MEES.2019.8896595.
 11. Golovan A, Rudenko S, Gritsuk I and Shakhov A 2018 Improving the process of vehicle units diagnosis by applying harmonic analysis to the processing of discrete signals SAE Technical Paper 2018-01-1774 <https://doi.org/10.4271/2018-01-1774>
 12. Golovan A et al. 2020 Features of mathematical modeling in the problems of determining the power of a turbocharged engine according to the characteristics of the turbocharger SAE Int. J. Engines 13(1) 5–16 <https://doi.org/10.4271/03-13-01-0001>

REFERENCES

1. Wang, T., & Li, T. (2022). Ship lock management and dynamic congestion toll for ships. *Ocean and Coastal Management*, 230, 106369. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106369>
2. State Service of Maritime and Inland Water Transport and Shipping of Ukraine – official portal. [Derzhavna sluzhba morskoho i vnutrishnoho vodnoho transportu ta sudnoplavstva Ukrainy – ofitsiinyi portal.] (2023). Retrieved January 15, 2023, from <https://marad.gov.ua/ua> [in Ukrainian]
3. Report on the state of safety of navigation and accidents on water transport in Ukraine (including abroad, but with Ukrainian vessels), including small

- (small) vessels, for January – June 2022 with an accumulative result. [Zvit pro stan bezpeky sudnoplavstva ta avariinosti na vodnomu transporti v Ukraini (u tomu chysli i za yii mezhamy, ale iz ukrainskymy sudnamy), vkluchaiuchy malomirni (mali) sudna, za sichen – cherven 2022 roku z narostaiuchym pidsumkom.] (2022, July 30). <https://marad.gov.ua/>. Retrieved January 15, 2023, from https://marad.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/Zvit_2022.pdf [in Ukrainian]
4. Zheng, Q.Q., Zhang, Y., He, L.J., & Tian, H.W. (2023). Discrete multi-objective artificial bee colony algorithm for green co-scheduling problem of ship lift and ship lock. *Advanced Engineering Informatics*, 55, 101897. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.101897>
 5. Deng, Y., Sheng, D., & Liu, B. (2021). Managing ship lock congestion in an inland waterway: A bottleneck model with a service time window. *Transport Policy*, 112, 142–161. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.08.017>
 6. Liu, C., Qi, J., Chu, X., Zheng, M., & He, W. (2021). Cooperative ship formation system and control methods in the ship lock waterway. *Ocean Engineering*, 226, 108826. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108826>
 7. Xu, J., Xuan, G., Li, Y., Li, Z., Hu, Y., Jin, Y., & Huang, Y. (2016). Study on the squat of extra-large scale ship in the Three Gorges ship lock. *Ocean Engineering*, 123, 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.07.001>
 8. Bugarski, V., Bačkalić, T., & Kuzmanov, U. (2013). Fuzzy decision support system for ship lock control. *Expert Systems with Applications*, 40(10), 3953–3960. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.12.101>
 9. Wang, H.Z., & Zou, Z.J. (2014). Numerical study on hydrodynamic interaction between a berthed ship and a ship passing through a lock. *Ocean Engineering*, 88, 409–425. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.07.001>
 10. A. Golovan, I. Gritsuk, S. Rudenko, V. Saravas, A. Shakhov and O. Shumylo. Aspects of Forming the Information V2I Model of the Transport Vessel, 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2019, pp. 390–393, doi: 10.1109/MEES.2019.8896595
 11. Golovan A, Rudenko S, Gritsuk I and Shakhov A 2018 Improving the process of vehicle units diagnosis by applying harmonic analysis to the processing of discrete signals SAE Technical Paper 2018-01-1774 <https://doi.org/10.4271/2018-01-1774>
 12. Golovan A et al. 2020 Features of mathematical modeling in the problems of determining the power of a turbocharged engine according to the characteristics of the turbocharger SAE Int. J. Engines 13(1) 5–16 <https://doi.org/10.4271/03-13-01-0001>

ОСОБЛИВОСТІ УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕКОЮ МАНЕВРУВАННЯ ПРИ ВИКОНАННІ ШВАРТОВИХ ОПЕРАЦІЙ ДО БОРТУ СУДНА

І.П. Гончарук¹, А.І. Головань², О.М. Шумило³, О.В. Шапов⁴

¹к.т.н., доцент кафедри судноводіння і морської безпеки,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-5306-4206

²к.т.н., доцент кафедри судноводіння і морської безпеки,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-6589-4381

³к.т.н., професор, проректор з навчально-педагогічної роботи,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-0574-1951

⁴к.т.н., директор Навчально-наукового інституту морського флоту,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-1913-379X

Анотація

Вступ. У статті розглядаються сучасні проблеми безпеки судноплавства, а також проблема дотримання безпеки маневрування при виконанні швартових операцій. На сучасному етапі становлення України особливого значення набуває фактор утвердження її як морської держави, виходячи з її просторових і геофізичних особливостей, місця та ролі у глобальній та регіональній системі міжнародних відносин. Проблема дотримання безпеки маневрування при виконанні швартових операцій визначається кількістю що зростає швартових операцій в умовах відкритого моря. Швартування до борту судна, що стоїть якорі, є дуже поширеним видом суднових ключових операцій. Виконання такого складного виду маневрування, як швартування на якорі, як правило, диктується виробничою необхідністю. Зважаючи на складність проведення швартовних операцій до борту судна, що стоїть на якорі, до неї вдаються не так часто, як, наприклад, до швартування на ходу, але в разі необхідності і з урахуванням ряду обставин вид швартування, що розглядається, використовується в морській практиці. Так, однією з основних причин вибору даного методу швартування є необхідність виконання невідкладних вантажних операцій в умовах відкритих рейдів або відкритого моря, коли неможливо захід судна в порт. Насамперед, це стосується промислових суден, які здійснюють промисел у віддалених районах світового океану, а також суден постачання, що виконують доставку вантажів до районів ведення пошукових та інших робіт, пов'язаних із освоєнням природних ресурсів морського шельфу. **Метою** статті є аналіз можливості безпечного виконання швартовної операції з метою вибору найбільш оптимальних способів їх виконання, з погляду безпеки. **Результати.** Запропоновані заходи та надані рекомендації, щодо вибору найбільш оптимальних, з погляду безпеки, способів виконання швартовних

операцій до борту судна. **Висновки.** Таким чином, безпека на морі взагалі і безпека швартових операцій, зокрема, завжди буде актуальною проблемою, вирішення якої вимагатиме великої кількості науково-дослідних робіт в області судноводіння.

Ключові слова: безпека маневрування, судно, умови відкритого моря.

FEATURES OF MANEUVERING SAFETY MANAGEMENT DURING SHIP-TO-SHIP DOCKING

I.P. Honcharuk¹, A.I. Golovan², O.M. Shumylo³, O.V. Shamov⁴

¹PhD (Engineering), Associate Professor of Navigation and Maritime Safety Department,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-5306-4206

²PhD (Engineering), Associate Professor of Navigation and Maritime Safety Department,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-6589-4381

³PhD (Engineering), Professor, Vice-rector for Educational and Pedagogical Work,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-0574-1951

⁴PhD (Engineering), Head of Maritime Training and Research Institute,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-1913-379X

Summary

Introduction. The article deals with the current problems of safety of navigation, as well as the problem of maneuvering safety during mooring operations. At the present stage of Ukraine's formation, the factor of its establishment as a maritime state, based on its spatial and geophysical features, place and role in the global and regional system of international relations, is of particular importance. The problem of maneuvering safety during mooring operations is determined by the growing number of mooring operations in the open sea. Mooring to an anchored vessel is a very common type of ship's key operations. Performing such a complex type of maneuvering as anchoring is usually dictated by operational necessity. Taking into account the complexity of mooring operations on board an anchored vessel, it is not used as often as, for example, mooring on the move, but if necessary and taking into account a number of circumstances, the type of mooring under consideration is used in maritime practice. Thus, one of the main reasons for choosing this method of mooring is the need to perform urgent cargo operations in the conditions of open roads or the open sea, when it is impossible to enter the port. First of all, this applies to industrial vessels engaged in fishing in remote areas of the world ocean, as well as supply vessels delivering cargoes to areas of prospecting and other works related to the development of natural resources of the sea shelf. The **purpose** of the article is to analyze the possibility of safe performance of mooring operations in order to choose the most optimal ways of their implementation in terms of safety. **Results.** Measures are proposed and recommendations are given on the choice of the most optimal, from the point of view of safety, ways of performing mooring operations to the vessel. **Conclusions.** Thus, safety at sea in general and safety of mooring operations, in

particular, will always be an urgent problem, the solution of which will require a large number of research works in the field of navigation.

Key words: *safety of maneuvering, vessel, open sea conditions.*

Вступ. На сучасному етапі становлення України особливого значення набуває фактор затвердження її як морської держави, виходячи з її просторових і геофізичних особливостей, місця та ролі у глобальній та регіональній системі міжнародних відносин. Україна здобула статус морської держави, зробивши вагомий внесок у розвиток мореплавства та вивчення Світового океану, а також завдяки сприятливому географічному положенню, зокрема, довжині морського узбережжя та площі водного простору. Україна має найбільшу серед держав Азово-Чорноморського басейну довжину морського узбережжя (2759,2 кілометра) і понад 72 тис. кв. кілометрів виключної морської економічної зони.

Постановка проблеми. Проблема дотримання безпеки маневрування при виконанні швартових операцій визначається ростом кількості швартових операцій в умовах відкритого моря. Це пов'язано з вивченням природних ресурсів на шельфі Чорного і Азовського морів, хоча через війну цей процес призупинено. Безпека на морі взагалі і безпека швартових операцій, зокрема, завжди буде актуальною проблемою, вирішення якої вимагатиме великої кількості науково-дослідних робіт в області судноводіння. Якщо швартовні операції будуть виконуватися з метою перевантажування нафти або нафтопродуктів, що ймовірно при сьогоденішньому розвитку подій у сфері освоєння нафтових та газових родовищ морського шельфу, актуальність теми безпеки швартовної операції збільшиться на порядок. При цьому не можна забувати, що, як і раніше, значима актуальність вирішення питання безпеки швартовних операцій в умовах відкритого моря для промислових суден.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В даний час дослідженню питань дотримання безпеки маневрування при виконанні швартових операцій присвячено цілий ряд публікацій [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. При вивченні теоретичних та практичних основ дотримання безпеки маневрування при виконанні швартових операцій встановлено, що ряд актуальних питань з організації їх роботи, аналіз стану та сучасних проблем у галузі, а також проблем розвитку морського та річкового транспорту залишаються або недостатньою мірою дослідженими, або вимагають уточнення, узагальнення та врахування сучасних вимог щодо організації перевезень вантажів.

Формулювання цілей статті. Метою статті є аналіз безпечних способів виконання швартових операцій до борту судна, яке стоїть на якорі.

Виклад основного матеріалу. Якірна стоянка є однією з ключових судових операцій, виконання якої, особливо в умовах відкритого моря, пов'язане з низкою ризиків, обумовлених як складністю самої операції постановки судна на якір та зняття з нього, так і впливом гідрометеорологічних умов у районі місця якірної стоянки. Стоянка на якорі в складних гідрометеорологічних умовах вимагає від судноводіїв постійного контролю за поведінкою судна, динамікою його переміщень та їх особливостями в умовах (напрямок і швидкість вітру, напрям і швидкість течії, наявність хвилювання, характер ґрунту та його рельєф) [4, 5].

У випадку якщо поведінка судна викликає сумніви в збереженні його безпеки, судноводій повинен негайно вжити заходів щодо забезпечення безпеки якірної стоянки або знятися з якоря, з переходом у інший, безпечний режим плавання. Постійна готовність до зняття судна з якоря є необхідною вимогою безпеки при виконанні якірної стоянки. Така готовність встановлюється капітаном судна з урахуванням місцевих умов стоянки, метеорологічний обставин, сформованого технологічного процесу, участь у якому бере судно як транспортний засіб, що виконує певну виробничу функцію. У даному випадку чимало важливим фактором є наявність у борту судна, що стоїть на якорі, іншого судна, задіяного у виконанні вантажних або інших операцій спільно з судном, що стоїть на якорі. Більше того, приймаючи рішення про спільне виконання вантажних операцій при стоянці на якорі, капітан судна, що стоїть на якорі, повинен прогнозувати розвиток подій на певну перспективу, щоб не опинитися в умовах, що вимагають виконання складних, часом нестандартних дій із забезпечення безпеки суден.

Судно, яке стоїть на якорі, при впливі на нього вітру, течії та хвилювання моря перебуває в стані постійного руху і безперервно змінює своє положення відносно лінії відданого якоря (лінії вітру, умовно для веденої через місце розташування якоря на ґрунті). Особливості руху судна, що стоїть на якорі, іншими словами, характер його нищпорення залежить від ряду факторів, найбільш значущими з яких є: основні розміри корпусу судна, водотоннажність; архітектурні особливості надводної частини корпусу судна, надбудов та рубок, зокрема, місце розташування більшої надбудови щодо площини мідель-шпангоуту; поточний стан завантаження судна, що визначає посадку (осаду, диферент) корпусу у воді; координати точки кріплення якірного ланцюга; кількість відданого якірного ланцюга; глибина місця якірної стоянки та її співвідношення з кількістю відданого якірного ланцюга; характер ґрунту в місці якірної стоянки; що тримає сила якірної системи (якір і якірний ланцюг); гідрометеорологічні умови у районі місця якірної стоянки; співвідношення між основними параметрами (напрямок, швидкість) вітру, течії та хвилювання.

Необхідно відзначити, що динаміка нищпорення судна, що стоїть на якорі, до цього часу практично не досліджена, що викликає певні складності при розробці безпечних способів маневрування суден, що виконують швартовні операції до борту судна, що стоїть на якорі. При ухваленні рішення про виконання або невиконання швартовної операції судноводії керуються виключно власним практичним досвідом, а за його відсутністю відмовляються від виконання швартовної операції до борту судна, що стоїть на якорі. Наслідком цього зазвичай є невинуватена втрата часу та інші експлуатаційні втрати.

Аналізуючи загальний характер динаміки руху судна, що стоїть на якорі, можна дійти невтішного висновку у тому, що він здійснює складні незатухаючі аперіодичні коливання, що супроводжуються змінами його положення у просторі щодо місця постановки якоря. При цьому спостерігається деяка симетрія у зазначених положеннях щодо деякої середньої лінії (лінія симетрії) положення, що проходить через натяг лінію якірного ланцюга [6].

Як встановлено в результаті чисельних спостережень за поведінкою судна, що стоїть на якорі, зазначені встановлені аперіодичні коливання призводять до змін

курсу судна в межах ($\pm 10-30$)°. Діапазон коливань курсу судна та величина відхилення його від лінії симетрії залежать від величини співвідношення між основними параметрами вітру та течії (швидкість та напрямок). Зокрема, за відсутності відносно великої швидкості течії в місці якірної стоянки коливання курсу будуть значними, як, втім, та амплітуда переміщень судна щодо умовної лінії симетрії істотно відрізняється від напрямку течії.

Практика показує, що при певному поєднанні впливів з боку вітру та течії, а саме при слабкому вітрі та сильній течії, коливальний процес руху судна буде стійкішим, і траєкторія руху судна змінюватиметься лише за зміни швидкості та напрямку течії. Наприклад, при стоянці судна в умовах припливів і відливів, що чергуються, воно плавно змінюватиме положення стійкої рівноваги при зміні напрямку течії. У цьому випадку слід звернути увагу на підвищену небезпеку під час проведення швартовних операцій у період зміни спрямування течії. При певній сталості вітрового навантаження, тобто при слабкому постійному вітрі нишпорення судна незначно і має періодичність коливальних рухів, що встановилася; при постійному перебігу нишпорення та амплітуда переміщень судна щодо лінії симетрії буде мінімальним. У зв'язку з цим необхідно більш детально досліджувати процес руху судна, що стоїть на якорі, в умовах великих вітрових навантажень. Розглянемо характерні особливості в переміщенні судна при впливі сильного вітру, що переважає за величиною силового впливу над течією. Надалі цей випадок, з погляду безпеки проведення швартовної операції, будемо розглядати як основний, визначаючи безпечний спосіб маневрування судна, що швартується, в процесі виконання ним швартування до борту судна, що стоїть на якорі.

В умовах сильного вітрового впливу в момент виходу на якірний ланцюг судно під впливом аеродинамічної сили та її моменту зміщується у бік лінії вітру (рис. 1), при цьому напрям зсуву залежить від положення центру парусності судна щодо площини мідель-шпангоуту.

Характер руху судна, що стоїть на якорі, може змінитися під впливом будь-якого додаткового зовнішнього впливу або внаслідок зміни параметрів, що визначають вітрове навантаження. У цьому випадку судноводію судна, що

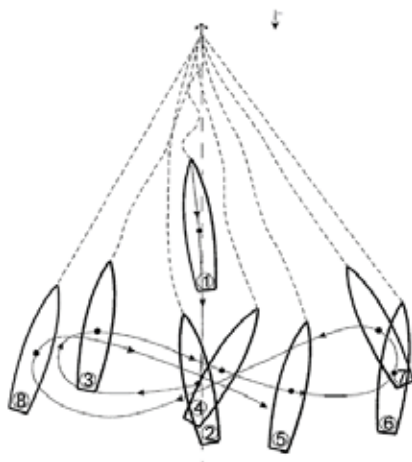


Рис. 1. Траєкторія руху судна при стоянці на якорі в умовах вітрового впливу

швартується, необхідно бути гранично уважним при визначенні як параметрів вітру, так і при спостереженні за особливостями в поведінці судна, до якого необхідно швартуватися.

Контролюючи поведінку судна, що стоїть на якорі, необхідно мати на увазі, що помилка у визначенні кількості витраченого якірного ланцюга може

привести не тільки до певних особливостей у характері нищпорення судна, але і до відриву якоря від ґрунту в момент знаходження судна в крайніх точках траєкторії його переміщення. Відрив якоря від ґрунту та зміна його положення можливі в тому випадку, коли зусилля в якірному ланцюзі достатньо для підйому тієї його частини, яка лежить на ґрунті. У зв'язку з цим слід уникати підходу до борту судна, що стоїть на якорі, в моменти виходу його в крайні точки траєкторії нищпорення, тому що в ці моменти можливий відрив якоря від ґрунту і, як наслідок, непередбачувана поведінка судна, що швартує.

Аналізуючи загальний характер динаміки руху судна, що стоїть на якорі, ми дійшли висновку у тому, що воно здійснює складні незатухаючі аперіодичні коливання, що супроводжуються змінами його положення у просторі відносно місця постановки якоря. При цьому спостерігається деяка симетрія у зазначених положеннях щодо деякої середньої лінії (лінія симетрії) положення, що проходить через лінію натягу якірного ланцюга.

Швартування до борту судна, що стоїть на якорі, є дуже поширеним видом судових ключових операцій. Виконання такого складного виду маневрування, як швартування на якорі, як правило, диктується виробничою необхідністю. Зважаючи на складність проведення швартовних операцій до борту судна, що стоїть на якорі, до неї вдаються не так часто, як, наприклад, до швартування на ходу, але в разі необхідності і з урахуванням ряду обставин вид швартування, що розглядається, використовується в морській практиці. Так, однією з основних причин вибору даного методу швартування є необхідність виконання невідкладних вантажних операцій в умовах відкритих рейдів або відкритого моря, коли неможливо захід судна в порт. Насамперед, це стосується промислових суден, які здійснюють промисел у віддалених районах світового океану, а також суден постачання, що виконують доставку вантажів до районів ведення пошукових та інших робіт, пов'язаних із освоєнням природних ресурсів морського шельфу. Крім того, необхідність виконання швартовної операції до борту судна, що стоїть на якорі, може виникнути в тому випадку, коли потрібно зробити розвантаження в районах, що не дозволяють великим судам підійти безпосередньо до берегових причалів, або доставити на судна при стоянці на рейдах екіпаж, різне постачання та інші вантажі [7].

Характер виконання складного маневрування під час проведення швартовної операції до борту судна, що стоїть на якорі, лише за відсутності чи незначному впливі зовнішніх чинників може певною мірою наближатися до характеру маневрування під час швартування до борту судна, що стоїть біля причалу в порту. Умови проведення швартовної операції до рухомого об'єкта набагато складніше та їх складність суттєво зростає, якщо гідрометеорологічні умови в районі якірної стоянки судна, що швартує, важко піддаються параметричній оцінці. У цих умовах не можна не зважати на рухливість судна, що стоїть на якорі, як об'єкта швартування,

при підході до його борту або при гідродинамічній взаємодії суден, що швартуються. Якщо судно яке швартує менше судна, що швартується, під час проведення швартовної операції необхідно також враховувати гідродинамічний вплив на судно що швартує, викликане роботою рухомо-кермового комплексу судна, що швартується. Коли в районі проведення швартовної операції як превалюючий зовнішній вплив на судно, що швартує, розглядається вітровий вплив, його нишпорення може бути непередбачуваним і це треба мати на увазі судоводію судна, що швартує при виборі місця якірної стоянки.

В умовах, коли судно, що швартується, рухається малим або найменшим ходом, його керованість істотно залежить від впливу вітрового впливу, а також впливу хвиль і течії. Виконувати складне маневрування в умовах зниженої керованості і здійснювати вихід до рухомого об'єкта – дуже складне завдання, початком виконання якого є вибір взаємної вихідної позиції суден, що швартуються, і визначення моменту початку руху судна, що швартується, в напрямку судна, що швартує [8, 9]. Вихідна позиція і момент початку руху до борту судна, що швартує, визначаються не тільки виходячи з маневрених характеристик судна, що швартується, з урахуванням впливу зовнішніх чинників, а й від характеру поведінки судна, що швартує під час виконання швартовної операції.

Вибір способу маневрування судна, що швартується, до борту судна, що стоїть на якорі, багато в чому залежить від співвідношення розмірів суден, що швартуються, гідрометеорологічних умов в районі виконання швартовної операції і характеру поведінки судна, що швартує в сформованих умовах зовнішніх впливів. У даному випадку оптимальним вважається варіант, коли судно, що швартується, менше за розмірами швартуючого судна [10]. Безпека швартовної операції двох однакових за розмірами суден може бути забезпечена лише за сприятливих гідрометеорологічних умов, тобто при стійких значеннях параметрів течії та невеликому за силою вітру в районі виконання швартовної операції.

Для вирішення завдань, пов'язаних з аналізом способів виконання швартовної операції до борту судна, що стоїть на якорі, на наш погляд, слід, насамперед, звернути увагу на методи та способи застосування сучасних комп'ютерних технологій з урахуванням існуючих технічних засобів, які існують у судоводінні. В даному випадку маються на увазі судові технічні засоби, що дозволяють здійснювати безперервний контроль за кінематичними та динамічними параметрами руху судна та керувати судном відповідно до заданих сигналів управління, що розраховуються за встановленим алгоритмом, виходячи з обставин, що складаються в процесі маневрування.

Основними технічними засобами, що використовуються в даному способі управління є:

- приймачі супутникової навігаційної системи, встановлені у двох, рознесених по довжині судна точках;
- бортовий комп'ютер, що забезпечує обробку інформації, що надходить з приймачів, та визначає параметри сигналу управління;
- судові засоби управління рухом судна, що швартується, здійснюють управління ним у заданому режимі руху.

Суть обраного способу управління судном при виконанні ним швартовної операції до борту судна, що стоїть на якорі, полягає в наступному. Сигнал управління рухом судна, що швартується, формується виходячи з величин поперечних зміщень розташованих на його діаметральній площині носової А і кормової В точки від поточного положення траєкторії зближення, які показані на Рисунку 2.

В процесі дослідження способів дотримання безпеки маневрування при виконанні швартових операцій розглянуті способи були порівнянні за наступними критеріями оптимальності:

перший – зменшення швидкості руху при зміні курсу;

другий – комплексний, до складу якого входить відхилення курсу судна від середнього значення та відхилення керма від нульового положення, що описується рівнянням:

$$Q_2 = \sqrt{\sum_k [(K_k - K_0)^2 + \rho \cdot \delta_k^2]} \quad (1)$$

В даному випадку критерій представлений відразу у вигляді суми, минаючи інтегральну форму. Цю суму логічно нормувати, відносячи перший доданок до квадрата заданого курсу K_0 , а другий – до квадрата модуля граничного положення керма. Оскільки доданки мають квадратичний характер, то з результуючої суми видобувається квадратний корінь. Звичайно, як і у разі використання першого критерію, віднести результат до однієї точки, поділивши його на кількість доданків. У цьому критерії використовуються відразу дві характеристики – зарискування

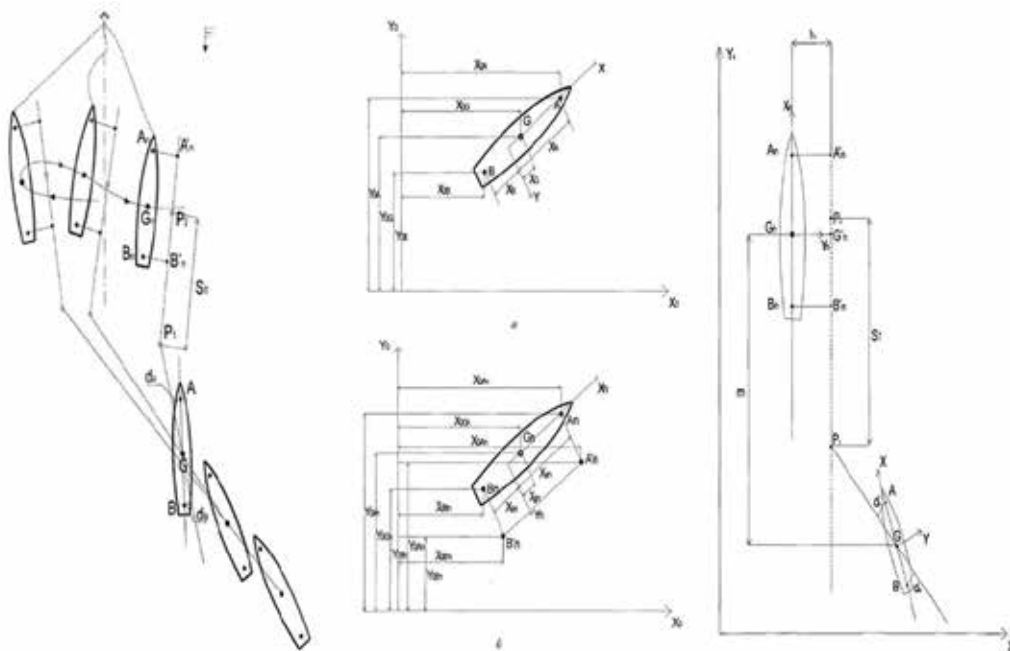


Рис. 2. Рух судна, що швартується при швартуванні з судном, що стоїть на якорі. Визначення координат точок судна, що швартується (а) та судна-партнера (б). Рух судна, що швартується, по траєкторіях зближення

і кут перекладки керма, тобто критерій носить комплексний характер, тому вираз (1) входить ваговий множник ρ , що дозволяє врівноважити ці два показники. Виходячи з вимог до зарискування ($\approx 17^\circ$) і знаючи порядок граничної кладки керма ($\approx 35^\circ$), можна прийняти цей множник рівним $(35/17)^2 \approx 0,25$. Саме таким у нашому випадку він і вибраний за підрахунками якості управління. Після запровадження цих критеріїв можна проводити власне моделювання різних варіантів підходу до мети, використовуючи різні управління.

Висновки. Таким чином, під час проведення аналізу опису поведінки судна, що стоїть на якорі, а також способів виконання швартовної операції до борту судна, що стоїть на якорі, за зазначеними критеріями обирано найбільш оптимальний, з погляду безпеки, спосіб виконання швартовних операцій до борту судна, а саме такий при якому всі етапи швартування передбачають рух уздовж прямих ліній або близьких до них траєкторій. Цей спосіб визначено, як спосіб що найбільш відповідає нормам безпеки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hornauer S. Trajectory Planning with Negotiation for Maritime Collision Avoidance / Hornauer S., Hahn A., Blaich M., Reuter J. // *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 9, № 3, 2015, page 335–341.
2. J. Lisowski. Analysis of Methods of Determining the Safe Ship Trajectory/ J. Lisowski// *TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 10, № 2, 2016, page 376–381.
3. Xu X. Modeling of Ship Collision Risk Index Based on Complex Plane and Its Realization/ Xu X., Geng X., Wen Y.Q. // *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 10, No. 2, 2016, page 251–256.
4. Lisowski, J. Game control methods in avoidance of ships collisions. *Polish Maritime Research*, 2012, 19(Special), 3–10. <https://doi.org/10.2478/v10012-012-0016-4>
5. Artyszuk Jaroslav. Ancor Forces in Ship Manoeuvring Mathematical Model. – Szczecin Maritime University, *Annual of Navigation*. – 2003. – № 6. – С. 14.
6. Kao Sheng-Long. A fuzzy logic method for collision avoidance in vessel traffic service / Kao Sheng-Long, Lee Kuo-Tien, Chang Ki-Yin, Ko Min-Der// *J.Navig.*, 2007. 60, № 1, p. 17–31.
7. A. Golovan, I. Gritsuk, S. Rudenko, V. Saravas, A. Shakhov and O. Shumylo. Aspects of Forming the Information V2I Model of the Transport Vessel, 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2019, pp. 390–393, doi: 10.1109/MEES.2019.8896595
8. Statheros Thomas. Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques / Statheros Thomas, Howells Gareth, McDonald-Maier Klaus. // *J. Navig.* 2008. 61, № 1, p. 129–142.
9. Golovan A, Rudenko S, Gritsuk I and Shakhov A 2018 Improving the process of vehicle units diagnosis by applying harmonic analysis to

the processing of discrete signals SAE Technical Paper 2018-01-1774
<https://doi.org/10.4271/2018-01-1774>

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

REFERENCES

1. Hornauer, S., Hahn, A., Blaich, M., & Reuter, J. (2015). Trajectory Planning with Negotiation for Maritime Collision Avoidance. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 9(3), 335–341. <https://doi.org/10.12716/1001.09.03.05>
2. Lisowski, J. (2016). Analysis of Methods of Determining the Safe Ship Trajectory. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 10(2), 223–228. <https://doi.org/10.12716/1001.10.02.05>
3. Xu, X., Geng, X., & Wen, Y. (2016). Modeling of Ship Collision Risk Index Based on Complex Plane and Its Realization. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 10(2), 251–256. <https://doi.org/10.12716/1001.10.02.07>
4. Lisowski, J. (2012). Game control methods in avoidance of ships collisions. *Polish Maritime Research*, 19(Special), 3–10. <https://doi.org/10.2478/v10012-012-0016-4>
5. Artyszuk, J. (2003). ANCHOR FORCES IN SHIP MANOEUVRING MATHEMATICAL MODEL. *Annual of Navigation*, 5–18.
6. Kao, S. L., Lee, K. T., Chang, K. Y., & Ko, M. D. (2006). A Fuzzy Logic Method for Collision Avoidance in Vessel Traffic Service. *Journal of Navigation*, 60(1), 17–31. <https://doi.org/10.1017/s0373463307003980>
7. Golovan, A., Gritsuk, I., Rudenko, S., Saravas, V., Shakhov, A., & Shumylo, O. (2019). Aspects of Forming the Information V2I Model of the Transport Vessel. 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). <https://doi.org/10.1109/mees.2019.8896595>
8. Statheros, T., Howells, G., & Maier, K. M. (2007). Autonomous Ship Collision Avoidance Navigation Concepts, Technologies and Techniques. *Journal of Navigation*, 61(1), 129–142. <https://doi.org/10.1017/s037346330700447x>
9. Golovan A, Rudenko S, Gritsuk I and Shakhov A 2018 Improving the process of vehicle units diagnosis by applying harmonic analysis to the processing of discrete signals SAE Technical Paper 2018-01-1774
<https://doi.org/10.4271/2018-01-1774>
10. Golovan A et al. 2020 Features of mathematical modeling in the problems of determining the power of a turbocharged engine according to the characteristics of the turbocharger SAE Int. J. Engines 13(1) 5–16
<https://doi.org/10.4271/03-13-01-0001>

**КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ
ТА НАДІЙНОСТІ АВТОНОМНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ
НА ПРИКЛАДІ СУДНА**

В.І. Чимшир

д.т.н., професор кафедри «Суднових енергетичних установок і систем»,
Дунайський інститут Національного університету

«Одеська морська академія»

ORCID ID: 0000-0003-3621-2702

Анотація

Вступ. Забезпечення безпеки та надійності автономних судів є актуальним та важливим завданням, яке потребує комплексного підходу. Визначено, що розробка нових технологій та методів, а також удосконалення стандартів та регуляторної політики можуть суттєво підвищити рівень безпеки та надійності автономних судів.

В процесі дослідження було з'ясовано, що концептуальні засади підвищення безпеки та надійності автономних суден полягають в системі підходів кожен з яких розкриває цілу низку проблем, які потребують досконалого вивчення та вирішення. Завдяки детальному аналізу підходів було визначено напрямки підвищення безпеки та надійності суден за рахунок методів, алгоритмів, інструкцій та регуляцій, які ще повинні бути розроблені та з часом удосконалені.

Метою даного дослідження є визначення концептуальних засад до підвищення безпеки та надійності автономних технічних систем на прикладі суден.

Результати. В основу концептуальних засад підвищення безпеки та надійності автономних суден були покладені три підходи це: розробка алгоритмів та методів ймовірнісного аналізу та машинного навчання, розробка стандартів та регуляторних політик та управління ризиками.

Перший підхід заснований на системному аналізі ризиків, який дозволяє виявити потенційні небезпеки та оцінити ймовірність їх виникнення. Запропоновані заходи для управління ризиками, які можуть включати зміну конструкції судна, поліпшення системи управління, навчання та сертифікацію екіпажу та інші. Другий запропонований підхід пов'язано з розробкою стандартів та регуляторних політик та включає в себе п'ять основних напрямків, це: встановлення вимог до автономних судів; встановлення вимог до персоналу; встановлення вимог до методів випробувань та сертифікації; встановлення вимог до систем моніторингу та управління ризиками; встановлення вимог до взаємодії автономних судів. Третій підхід полягає в розробці алгоритмів та методів ймовірнісного аналізу та машинного навчання.

Висновки. Кожен із підходів до підвищення безпеки та надійності автономних суден було розглянуто та надані пропозиції щодо подальшого їх удосконалення.

Ключові слова: підвищення безпеки, надійність, автономність, судно, технічна система.

CONCEPTUAL PRINCIPLES OF IMPROVING THE SAFETY
AND RELIABILITY OF AUTONOMOUS TECHNICAL SYSTEMS USING
A SHIP AS AN EXAMPLE

V.I. Chymshyr

D.Sc., Professor of the Department of Ship Power Plants and Systems,
Danube Institute of the National University
"Odesa Maritime Academy"
ORCID ID: 0000-0003-3621-2702

Summary

Introduction. Ensuring the safety and reliability of autonomous ships is an urgent and important task that requires a comprehensive approach. It has been determined that the development of new technologies and methods, as well as the improvement of standards and regulatory policies, can significantly increase the level of safety and reliability of autonomous ships.

In the course of the research, it was found that the conceptual principles of improving the safety and reliability of autonomous vessels lie in a system of approaches, each of which reveals a whole range of problems that require thorough study and resolution. Thanks to a detailed analysis of these approaches, directions for improving the safety and reliability of ships through the use of methods, algorithms, instructions, and regulations that still need to be developed and improved over time have been identified.

Purpose. Defining the conceptual foundations for improving the safety and reliability of autonomous technical systems using the example of ships.

Results. The conceptual principles of improving the safety and reliability of autonomous ships are based on three approaches: the development of algorithms and methods for probabilistic analysis and machine learning, the development of standards and regulatory policies, and risk management.

The first approach is based on a systemic risk analysis, which allows identifying potential hazards and assessing the probability of their occurrence. Proposed risk management measures may include changes to the ship's design, improvements to the management system, crew training and certification, and others. The second proposed approach is related to the development of standards and regulatory policies and includes five main directions: establishing requirements for autonomous vessels, establishing requirements for personnel, establishing requirements for testing and certification methods, establishing requirements for risk monitoring and management systems, and establishing requirements for autonomous vessel interactions. The third approach involves developing algorithms and methods for probabilistic analysis and machine learning.

Conclusions. Each of these approaches to improving the safety and reliability of autonomous ships has been considered, and proposals for their further improvement have been made.

Key words: safety improvement, reliability, autonomy, ship, technical system.

Вступ. Автономні технічні системи стають все більш поширеними і відіграють важливу роль у різних сферах людської діяльності, починаючи від промисловості

та закінчуючи авіаційною та суднобудівельною. Однак, з розвитком технологій та збільшеною складністю систем, з'являються нові загрози безпеці та надійності, які можуть призвести до катастрофічних наслідків.

Для підвищення безпеки та надійності автономних систем необхідно або розробити більш ефективні, або удосконалити існуючі підходи, методи та моделі. На сьогоднішній день існує безліч підходів, таких як використання формальних методів верифікації та аналізу, тестування та налагодження на ранніх стадіях розробки, забезпечення захисту від зовнішніх загроз тощо.

Одним із ключових підходів до підвищення безпеки та надійності автономних систем є управління ризиками. Воно включає ідентифікацію, аналіз та управління ризиками, пов'язаними з автономними системами, а також впровадження заходів для мінімізації цих ризиків.

Важливим підходом також є розробка стандартів та регуляторних політик. Створення уніфікованих стандартів та правил, які повинні дотримуватися при розробці та експлуатації автономних систем, може значно покращити їхню безпеку та надійність.

За аналізом великої кількості досліджень найактуальнішим є підхід заснований на розробці алгоритмів та методів ймовірнісного аналізу та машинного навчання.

Актуальність дослідження. Концептуальні засади до підвищення безпеки та надійності автономних технічних систем повинні бути багаторівневими, включати широкий спектр заходів і враховувати безліч факторів, пов'язаних з їх використанням у різних галузях. Концепція автономних суден - це новий і перспективний напрямок у розвитку суднобудування, однак високий рівень автоматизації може призвести до нових ризиків і виявити нові проблеми у забезпеченні їх безпеки та надійності.

Представимо низку актуальних досліджень, які стосуються проблем підвищення безпеки та надійності автономних суден.

У статті Barrera C. та його співавторів [1] описується проблема безпеки та надійності в системах безпілотних суден. Автори розглядають ключові аспекти у сфері безпеки, включаючи управління рухом, детектування перешкод, диспетчеризацію та виявлення витоків палива, а також розглядають методи підвищення безпеки та надійності безпілотних суден.

Автори дослідження [2], розглядають загрози кібербезпеки, такі як атаки на бортові системи, кібершпигунство і кібертероризм, а також представляють методи захисту та забезпечення безпеки бортових систем.

Дослідження Montewka J. та співавторів [3] присвячено проблемі автономного судноплавства, таким як навігація, управління рухом, виявлення перешкод та взаємодія з навколишнім середовищем. Досить оригінально представлено рішення для покращення безпеки та надійності автономних суден.

У дослідженні [4] описуються основні технології, що використовуються в автономних суднах, такі як системи позиціонування, управління рухом, детектування перешкод та взаємодія з довкіллям. Автори також обговорюють проблеми безпеки та надійності автономних суден та надають поради щодо використання методів підвищення безпеки плавання у складних навігаційних умовах.

Наступним цікавим дослідженням на цю тему є робота авторів [5]: Т.-е. Kim, J.-U. Schröder-Hinrichs. У цій статті обговорюються перспективи та можливості автономних суден, досліджуються технічні, економічні та соціальні фактори, що впливають на розвиток автономних суден, та пропонуються шляхи підвищення безпеки та надійності в автономних судах.

Цікавим прикладом практичного застосування автономних суден є дослідження [6]. У цій роботі описується проект автономного судна для перевезення контейнерів із Північної Німеччини до країн Балтійського регіону, та проводиться аналіз ризиків, пов'язаних із використанням автономних суден у цій маршрутній мережі.

Ще одна важлива робота на цю тему [7]. У цій статті розглядаються виклики кібербезпеки, пов'язані з автономними суднами, та надаються рекомендації для забезпечення безпеки та надійності автономних суден в умовах зростаючої загрози кібератак.

Нарешті, ще одна важлива робота [8], що на наш погляд є методологічною. У цій статті описуються різні методи оцінки безпеки та надійності автономних суден, включаючи формальні методи, методи ймовірнісного аналізу та методи машинного навчання. Також обговорюються фактори, що впливають на безпеку та надійність автономних суден, та розглядаються питання тестування та сертифікації автономних суден.

На підтвердження високої актуальності дослідження [8] можна відзначити, що дослідження в галузі методів машинного навчання при проектуванні автономних суден продовжують розвиватися, і в останні роки були представлені значні досягнення. Одним із основних напрямків досліджень є застосування глибокого навчання, яке дозволяє моделювати та оптимізувати складні системи автономного управління судном.

У статті [9] відображена ця тенденція, представлений підхід, що ґрунтується на використанні глибоких нейронних мереж для управління маневреними операціями автономних суден. Автори репрезентують результати чисельних експериментів, які показують ефективність запропонованого методу в реальних умовах.

Використання методу глибокого навчання нейронної мережі з можливістю навчання системи керування для розробки, моніторингу та інспекції автономного судна розглянуто в дослідженні [10]. Автори демонструють ефективність запропонованого методу в реальних умовах при виконанні безлічі завдань, таких як виявлення небезпечних об'єктів та моніторинг водного середовища.

Метою даного дослідження є визначення концептуальних засад до підвищення безпеки та надійності автономних технічних систем на прикладі суден.

Виклад основного матеріалу.

Під концептуальними засадами підвищення безпеки та надійності автономних технічних систем будемо розуміти систему підходів, методів алгоритмів застосування яких дозволяє підвищити їх безпеку та надійності в реальних умовах їх експлуатації.

Розглянемо основні підходи до підвищення безпеки та надійності автономних технічних систем (рис. 1), до них можна віднести.

Як було зазначено вище, одним із ключових підходів до підвищення безпеки та надійності автономних систем є управління ризиками. Даний підхід ґрунтується



Рис. 1. Підходи до підвищення безпеки та надійності автономних технічних систем

на управлінні ризиками, спрямований на підвищення безпеки та надійності автономних судів та передбачає визначення потенційних небезпек та ризиків, пов'язаних з експлуатацією автономних судів, та розробку стратегій для зниження цих ризиків до прийняттого рівня.

Основним компонентом цього підходу є системний аналіз ризиків, який дозволяє виявити потенційні небезпеки та оцінити ймовірність їх виникнення. Після цього розробляються заходи для управління ризиками, які можуть включати зміну конструкції судна, поліпшення системи управління, навчання та сертифікацію екіпажу та інші. В рамках цього підходу можна запропонувати такі зміни у конструкції автономних судів (рис. 2):

– додавання резервних систем та компонентів: встановлення резервних систем та компонентів, які можуть замінити основні у разі їх відмови, може



Рис. 2. Зміни у конструкції автономних судів

підвищити надійність автономного судна та знизити ймовірність виникнення аварійних ситуацій;

- використання систем діагностування та прогнозування: системи діагностики та прогнозування дозволяють виявляти несправності та передбачати можливі відмови систем та компонентів автономного судна. Це дозволяє оперативно реагувати на проблеми та запобігати можливим аваріям;

- розробка автоматичних систем керування: автоматичні системи керування дозволяють мінімізувати людський фактор в керуванні автономним судном, що може знизити ймовірність помилок та аварій;

- використання систем штучного інтелекту: системи штучного інтелекту можуть бути використані для аналізу великих обсягів даних та прийняття рішень у режимі реального часу. Це може допомогти автономному судну швидко реагувати на зміни довкілля та мінімізувати ризики виникнення аварійних ситуацій;

- посилення бортового обладнання для виявлення перешкод: посилення бортового обладнання для виявлення перешкод, таких як радары та камери, може знизити можливість зіткнення автономного судна з іншими суднами або об'єктами в морі;

- розвиток системи аварійного живлення: системи аварійного живлення, які можуть зберігати працездатність необхідних систем та компонентів у разі відключення основного джерела живлення, можуть бути корисними в екстрених ситуаціях, коли безпека автономного судна залежить від безперервної роботи деяких систем та пристроїв.

Для реалізації цього підходу необхідно встановити систему моніторингу та контролю за станом автономного судна та його оточення. Це дозволяє своєчасно виявляти відхилення від норми та вживати заходів для запобігання можливим аварійним ситуаціям.

Важливим аспектом управління ризиками є також розробка та реалізація планів евакуації та порятунку, які мають гарантувати безпеку екіпажу та пасажирів у разі виникнення аварійних ситуацій.

Цей підхід є ефективним інструментом для підвищення безпеки та надійності автономних суден, оскільки він дозволяє виявляти потенційні ризики та розробляти заходи для їхньої мінімізації до того, як вони призведуть до аварійної ситуації.

Наступним підходом до підвищення безпеки та надійності автономних систем є розробка стандартів та регуляторних політик. У рамках даного підходу, заснованого на управлінні ризиками, можна зазначити такі пропозиції щодо розробки стандартів та регуляторної політики (рис. 3):

- встановлення вимог до автономних судів: щодо їхньої конструкції, виробничого процесу, методів випробувань, технічної документації тощо. Ці стандарти та нормативні документи можуть також визначати вимоги щодо безпеки та надійності судна, методів оцінки ризиків та прийняття рішень у разі аварій;

- встановлення вимог до персоналу: ці стандарти можуть визначати вимоги до освіти, кваліфікації, досвіду роботи, професійної підготовки та інших аспектів, які необхідні для забезпечення безпеки та надійності судна;



Рис. 3. Пропозиції щодо розробки стандартів та регуляторної політики

- встановлення вимог до методів випробувань та сертифікації: ці стандарти можуть визначати методи випробування, які повинні використовуватися для оцінки безпеки та надійності судна, а також вимоги до процедур сертифікації;
- встановлення вимог до систем моніторингу та управління ризиками: ці стандарти можуть визначати вимоги до систем моніторингу стану судна, методів оцінки ризиків та прийняття рішень у разі аварій.
- встановлення вимог до взаємодії автономних судів: ці стандарти можуть визначати систему комунікації автономних суднів, прогнозування маневрів, узгодження руху.

Деякі дослідники також рекомендують використовувати мультиагентну систему для забезпечення безпеки та надійності автономних суден. Ця система дозволяє координувати дії різних компонентів автономної системи та приймати рішення на основі локальних знань та даних. Це може підвищити ефективність системи в умовах складного та динамічного навколишнього середовища.

Наступний підхід до підвищення безпеки та надійності автономних систем ґрунтується на підставі великої кількості досліджень вітчизняних та закордонних науковців та полягає в розробці алгоритмів та методів ймовірнісного аналізу та машинного навчання.

Існує кілька напрямків у розробці нових алгоритмів та методів глибокого машинного навчання для забезпечення безпеки та надійності автономних судів (рис. 4):

- розробка алгоритмів визначення стану судна та його навколишнього середовища на основі обробки даних датчиків та візуальних засобів. Це може включати аналіз відеозображень і даних сонарів, лідарів і радарів, а також використання додаткових датчиків для отримання додаткових даних про стан навколишнього середовища;
- розробка алгоритмів управління рухом судна на основі даних про його стан та стан навколишнього середовища. Це може включати оптимальне планування маршруту і управління швидкістю, регулювання відстані до інших судів і прийняття рішень в аварійних ситуаціях;



Рис. 4. Алгоритми та методи глибокого машинного навчання для забезпечення безпеки та надійності автономних судів

– розробка алгоритмів навчання з підкріпленням для навчання автономних судів прийматиме оптимальні рішення в різних ситуаціях. Це може включати створення симуляційних середовищ для навчання судна на певних маршрутах, а також використання даних про історію маршрутів і ситуацій для поліпшення алгоритмів;

– розробка алгоритмів моніторингу та діагностики стану автономних судів. Це може включати аналіз даних датчиків та інших пристроїв, а також створення системи діагностики для раннього виявлення потенційних проблем і відмов;

– розробка методів захисту від кібератак та забезпечення безпеки інформації, що зберігається на борту автономних суден.

Ці напрями можуть бути основою для створення нових алгоритмів та методів глибокого машинного навчання для забезпечення безпеки та надійності автономних судів.

Висновки. Таким чином, забезпечення безпеки та надійності автономних судів є актуальним та важливим завданням, яке потребує комплексного підходу. Розробка нових технологій та методів, а також удосконалення стандартів та регуляторної політики можуть суттєво підвищити рівень безпеки та надійності автономних судів.

Проведені дослідження допомагають глибше зрозуміти виклики, що стоять перед проектуванням, експлуатацією, технічним обслуговуванням автономних суден, а також зрозуміти, як підвищити їхню безпеку і надійність.

В процесі дослідження було з'ясовано, що концептуальні засади підвищення безпеки та надійності автономних суден полягають в системі підходів кожен з яких розкриває цілу низку проблем, які потребують досконалого вивчення та вирішення. Завдяки детальному аналізу підходів було визначено напрямки підвищення безпеки та надійності суден за рахунок методів, алгоритмів, інструкцій та регуляцій, які ще повинні бути розроблені та з часом удосконаленні.

В основу концептуальних засад підвищення безпеки та надійності автономних суден були покладені три підходи це: розробка алгоритмів та методів

ймовірнісного аналізу та машинного навчання, розробка стандартів та регуляторних політик та управління ризиками.

Кожен із підходів до підвищення безпеки та надійності автономних суден було розглянуто та надані пропозиції щодо подальшого їх удосконалення.

В цілому, можна зазначити, що дослідження в напрямку підвищення безпеки та надійності автономних суден продовжують просуватися, і вже на цьому етапі представлені значні досягнення. Однак, як було зазначено, оскільки автономні судна є складними технічними системами, їх проектування та навчання з метою забезпечення їх безпеки та надійності, потребує додаткових досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Barrera C., Padrón Armas I., Luis F., Llinas O., Marichal N. Trends and Challenges in Unmanned Surface Vehicles (USV)//From Survey to Shipping. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. Vol. 15. No. 1. 2021. pp. 135–142. doi:10.12716/1001.15.01.13.
2. Ziajka-Poznańska E, Montewka J. Costs and Benefits of Autonomous Shipping// A Literature Review. *Applied Sciences*. 2021; 11(10):4553. <https://doi.org/10.3390/app11104553>
3. Montewka J., Wróbel K. Challenges, solution proposals and research directions in safety and risk assessment of autonomous shipping// *Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM*. Los Angeles. 2018.
4. Bai, X., Li, B., Xu, X. et al. A Review of Current Research and Advances in Unmanned Surface Vehicles// *J. Marine. Sci. Appl.* 2022. 21, PP. 47–58. <https://doi.org/10.1007/s11804-022-00276-9>
5. Kim T.-e., Schröder-Hinrichs J.-U.. Research Developments and Debates Regarding Maritime Autonomous Surface Ship// Status, Challenges and Perspectives. 2021. B.-W. Ko, D.-W. Song (eds.), *New Maritime Business, WMU Studies in Maritime Affairs* 10, https://doi.org/10.1007/978-3-030-78957-2_10
6. Kretschmann L., Burmeister H.-C., Jahn C. Analyzing the economic benefit of unmanned autonomous ships: An exploratory cost-comparison between an autonomous and a conventional bulk carrier// *Research in Transportation Business & Management*. Volume 25, December 2017, PP. 76–86.
7. Akpan, F.; Bendiab, G.; Shiaeles, S.; Karamperidis, S.; Michaloliakos, M. Cybersecurity Challenges in the Maritime Sector // *Network* 2022, 2, PP. 123–138. <https://doi.org/10.3390/network2010009>
8. Toroody A., Abaei M. On reliability assessment of ship machinery system in different autonomy degree; A Bayesian-based approach// *Ocean Engineering*. Volume 254, 15 June, 2022, PP. 111–122.
9. Woo J., Yu C., Kim N. Deep reinforcement learning-based controller for path following of an unmanned surface vehicle// *Ocean Engineering*. Volume 183, 1 July 2019, PP. 155–166.

10. J. Taipalmaa, N. Passalis, H. Zhang, M. Gabbouj and J. Raitoharju. High-Resolution Water Segmentation for Autonomous Unmanned Surface Vehicles: a Novel Dataset and Evaluation// 2019 IEEE 29th International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP). Pittsburgh, PA, USA, 2019. pp. 1–6, doi: 10.1109/MLSP.2019.8918694

REFERENCES

1. Barrera, C., Padron Armas, I., Luis, F., Llinas, O., & Marichal, N.Á. (2021). Trends and challenges in unmanned surface vehicles (USV): From survey to shipping. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 15(1), 135–142. <https://doi.org/10.12716/1001.15.01.13>
2. Ziajka-Poznańska, E.; Montewka, J. Costs and Benefits of Autonomous Shipping – A Literature Review. *Appl. Sci.* 2021, 11, 4553. <https://doi.org/10.3390/app11104553>
3. Montewka J., Wróbel K. Challenges, solution proposals and research directions in safety and risk assessment of autonomous shipping. *Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM 14*, September 2018, Los Angeles, CA.
4. Bai, X., Li, B., Xu, X. et al. A Review of Current Research and Advances in Unmanned Surface Vehicles. *J. Marine. Sci. Appl.* 21, 47–58 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11804-022-00276-9>
5. Kim T.-e., Schröder-Hinrichs J.-U. Research Developments and Debates Regarding Maritime Autonomous Surface Ship: Status, Challenges and Perspectives. 2021. B.-W. Ko, D.-W. Song (eds.), *New Maritime Business, WMU Studies in Maritime Affairs* 10, https://doi.org/10.1007/978-3-030-78957-2_10
6. Kretschmann L., Burmeister H.-C., Jahn C. Analyzing the economic benefit of unmanned autonomous ships: An exploratory cost-comparison between an autonomous and a conventional bulk carrier. *Research in Transportation Business & Management*. Volume 25, December 2017, Pages 76–86.
7. Akpan, F.; Bendiab, G.; Shiaeles, S.; Karamperidis, S.; Michaloliakos, M. Cybersecurity Challenges in the Maritime Sector. *Network* 2022, 2, 123–138. <https://doi.org/10.3390/network2010009>
8. Toroody A., Abaei M. On reliability assessment of ship machinery system in different autonomy degree; A Bayesian-based approach. *Ocean Engineering*. Volume 254, 15 June 2022, Pages 111–122.
9. Woo J., Yu C., Kim N. Deep reinforcement learning-based controller for path following of an unmanned surface vehicle. *Ocean Engineering*. Volume 183, 1 July 2019, Pages 155–166.
10. J. Taipalmaa, N. Passalis, H. Zhang, M. Gabbouj and J. Raitoharju, "High-Resolution Water Segmentation for Autonomous Unmanned Surface Vehicles: a Novel Dataset and Evaluation," 2019 IEEE 29th International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP), Pittsburgh, PA, USA, 2019, pp. 1–6, doi: 10.1109/MLSP.2019.8918694

**ОСОБЛИВОСТІ ПРАВОВОГО РЕГУЛЮВАННЯ ОХОРОНИ ПРАЦІ
З УРАХУВАННЯМ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ
НА ЕКІПАЖ СУДНА В СИСТЕМІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
БЕЗПЕКИ СУДНОПЛАВСТВА**

А.О. Яківчук¹, О.В. Логінов², Л.В. Логінова³, С.В. Козловський⁴

¹студентка 1 курсу магістратури спеціальності 081 – Право,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0009-0004-1586-2583

²к.т.н., доцент кафедри «Морське право»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-4540-731X

³старший викладач кафедри «Філологія»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0003-2263-9457

⁴к.т.н., доцент кафедри
«Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-3176-835X

Анотація

Вступ. Морська професія пов'язана із специфічними умовами праці тому, що професійна діяльність екіпажу судна, відбувається в обмежених умовах судна, що значною мірою впливає на психічне здоров'я моряків. Моряки відіграють відносно унікальну роль у тому, що вони перебувають на робочому місці як у робочий, так і в неробочий час разом із лише своїми колегами, що робить їх надзвичайно ізольованою робочою групою.

Специфіка організації охорони праці членів екіпажу під час рейсу полягає у тому, що ризик створюється не тільки виробничими факторами, а й природно-кліматичними умовами, можливістю інфікування у портах, загрозою потрапляння у піратський полон тощо. Особливість правового регулювання опонаднормових робіт на водному транспорті у період застосування судна за призначенням полягає в тому, що виконання цих робіт не обмежене граничними нормами. Отже, є необхідність визначення кола осіб, що можуть бути залучені до додаткових, «авральних» робіт, а також визначення тривалості такої роботи на добу. Крім того, постійно зростає тривалість рейсів, що зумовлює спеціальне нормування термінів рейсів і безперервного перебування судових екіпажів у морі. Терміни безперервного перебування в морі можна диференціювати залежно від типу суден і районів плавання.

При цьому не можна не виділити такі фактори, як оснащеність судна, сучасність устаткування, сезон перебування в морі. Психічне здоров'я прямо залежить від ментального здоров'я. Згідно з визначенням, яке пропонує Всесвітня

організація охорони здоров'я, під ментальним здоров'ям розуміють стан щастя, добробуту, в якому людина реалізує свої творчі здібності, може протистояти життєвим стресам, продуктивно працювати та робити внесок у суспільне життя, тому важливо зберігати ментальне здоров'я кожного працівника, особливо на морському транспорті.

Мета. Метою даної публікації є дослідження охорони праці на водному транспорті, а також, що саме призводить до порушення у психічній діяльності, професійного вигорання, через що відбувається зниження працездатності у фахівців водного транспорту. Все це, може нести загрозу безпеці екіпажу всього судна.

Ключові слова: водний транспорт, працівник водного транспорту, стан здоров'я, екіпаж морського судна, нещасний випадок, ментальне здоров'я моряка.

FEATURES OF THE LEGAL REGULATION OF LABOR PROTECTION, TAKING INTO ACCOUNT THE FACTORS THAT AFFECT THE SHIP'S CREW IN THE SYSTEM OF SECURITY AND SAFETY IN SHIPPING

A.O. Yakivchuk¹, O.V. Lohinov², L.V. Lohinova³, S.V. Kozlovskiy⁴

¹Student of the 1st year of the master's degree, specialty 081 – Law
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0009-0004-1586-2583

²Candidate of Technical Sciences, docent of department «Maritime law»
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-4540-731X

³Senior Lecturer of Department «Philology»
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-2263-9457

⁴Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department
«Ship power plants and technical operation»,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-3176-835X

Summary

Introduction. The maritime profession is associated with specific working conditions because the professional activity of the ship's crew takes place in the limited conditions of the ship, which significantly affects the mental health of seafarers. Seafarers play a relatively unique role in that they are on the job both during and after hours with only their colleagues, making them an extremely isolated work group.

The specificity of the organization of labor protection of crew members during the voyage is that the risk is created not only by production factors, but also by natural and climatic conditions, the possibility of infection in ports, the threat of being captured by pirates, etc. The peculiarity of the legal regulation of overtime work on water transport during the period of use of the vessel for its intended purpose is that the performance of these works is not limited by the limit norms. Therefore, there is a need to determine the circle of persons who can be involved in additional, "emergency" work, as well as to determine the duration of such work per day. In addition, the duration of voyages is constantly increasing, which leads to a special regulation of the terms of voyages and the continuous stay of ship crews at sea. The terms of continuous stay at sea can be differentiated depending on the type of vessels and sailing areas.

At the same time, it is impossible not to highlight such factors as the equipment of the vessel, the modernity of the equipment, the season of stay at sea. Mental health is directly related to mental health. According to the definition proposed by the World Health Organization, mental health is understood as a state of happiness, well-being in which a person realizes his creative abilities, can resist life's stresses, work productively and contribute to social life, therefore it is important to maintain mental the health of every worker, especially in maritime transport.

Goal. *The purpose of this publication is the study of labor protection in water transport, as well as what exactly leads to a violation of mental activity, professional burnout, due to which there is a decrease in the working capacity of water transport specialists. All this can pose a threat to the safety of the entire ship's crew.*

Key words: *water transport, water transport worker, state of health, sea vessel crew, accident, seafarer's mental health.*

Виклад основного матеріалу. Під ментальним здоров'ям моряка можна визначити як високий рівень стресостійкості та соціально-психологічної адаптації до специфічних, екстремальних умов судна, що виявляється в гармонійному існуванні в багатонаціональному екіпажі, суб'єктивному відчутті емоційного і психологічного комфорту, психологічного благополуччя. Це точка балансу між повсякденними проблемами, з якими стикається фахівець, та ресурсами і навичками, якими він володіє для психологічної виснаженості а інших факторів впливу [1].

В першій половині 2021 року пандемія COVID-19 поставила перед моряками особливі проблеми, зокрема, як боротися з випадками інфекції на борту, як зменшити поширення хвороби на судні, як обробляти карантин і тестування моряків, взаємодію з береговим персоналом у портах, зміну екіпажу та зменшення можливостей відпустки на берег. У грудні 2020 року Комітет експертів Міжнародної організації праці (МОП) постановив, що уряди не виконали свій обов'язок піклуватися про моряків під час пандемії, не дотримуючись мінімальних стандартів основних прав, таких як охорона здоров'я, репатріація, щорічна відпустка та відпустка на берег, викладені в міжнародному праві. Також повідомлялося, що під час піку пандемії на лінії допомоги морякам ISWAN кількість випадків зросла втричі. Тому зараз особливо важливо зрозуміти фактори ризику погіршення психічного здоров'я співробітників морських організацій і те, як найкраще підтримати морський персонал [2].

При аналізі даних листків непрацездатності, психологічні діагнози вплинули переважно на наймолодшу вікову групу (30 років і молодше) і зменшилися з кожною віковою категорією. Аналогічно, більшість заяв про психічні захворювання були подані персоналом віком до 40 років. Було також виявлено, що молодший персонал значно частіше зазнає самонасилля (наприклад, самоушкодження, суїцидальні думки), депресії, стресу, сонливості, дистресу, пов'язане з роботою вигорання і розумова втома, ніж старший персонал, тоді як психологічний капітал (визначений як набір ресурсів, включаючи самоефективність, оптимізм, надію та стійкість) значно зростає з віком. При дослідженні студентів Морських академій виявилось, що депресія та тривога були значно вищими у студентів старше 22 років [3].

Дуже небагато досліджень розглядали стать як предиктор добробуту, оскільки більшість досліджуваних популяцій складала переважно чоловіки. Було виявлено, що стать не пов'язана із сонливістю або самопочуттям, хоча в одному дослідженні серед військовослужбовців, призначених на військову службу, було встановлено, що жінки були пов'язані з більшою вірогідністю скринінгу на ризик депресії.

Результати щодо етнічної приналежності чи національності як прогностичних факторів психічного здоров'я були неоднозначними. Більше заяв про психічні захворювання було зроблено персоналом з Європи чи Філіппін / Тихоокеанського регіону, ніж з інших частин Азії. Дослідження виявили вищий рівень стресу у жителів Східної Азії, ніж у жителів Південної Азії та європеїдної раси, а також у жителів Південної Азії, ніж у кавказького, змішаного, середньо-східного та латиноамериканського/ іспаномовного персоналу, а також більшу фізичну втому у філіппінців, ніж у норвежців. Одне дослідження показало, що європейські моряки мають значно вищий психологічний капітал, ніж філіппінці; інший виявив, що неєвропейські моряки мають дещо вищу емоційну втому, ніж європейці, але незначно; також не відрізнялися сонливістю.

Одне дослідження показало, що ризик депресії був значно вищим у тих, хто мав латиноамериканську етнічну приналежність будь-якої статі, і вищий у осіб чорношкірої етнічної приналежності, якщо вони також були жінками. Науковці виявили, що симптоми психічного здоров'я були більш поширені серед італійських моряків, ніж інших національностей. Моряки з китайських компаній повідомили про більш високу втому, ніж ті, хто працює в європейських країнах, незалежно від звання чи відділу.

Моряки повідомили, що порушення сну (спричинене постійними перервами уві сні, роботою вночі та раннім прокиданням) було однією з головних труднощів, з якими вони стикалися на борту. Було виявлено, що поганий сон пов'язаний із погіршенням психічного здоров'я, депресією, емоційним виснаженням і деперсоналізацією і втомою. Моряки з високою сонливістю, ніж середня, частіше відчували професійне вигорання. В іншому дослідженні погана якість сну та порушення сну були пов'язані з втомою у працівників китайських судноплавних компаній, але не європейських.

У дослідженні Schmied та ін. стрес був найпоширенішою перешкодою для отримання достатньої кількості сну, за яким слідували змінні графіки. У цьому дослідженні багато хто надавав перевагу іншим видам діяльності над сном у вільний час, часто жертвуючи сном заради вправ або навчання для отримання кваліфікації. Більше половини сказали, що стрес вплинув на їхній сон, часто через проблеми та тиск, пов'язані з роботою, і багато хто описав стан підвищеної пильності під час перебування на кораблі, що означало, що вони легко прокидалися.

Соціальна згуртованість вважалася дуже важливою – досліджень визначили кілька способів створення соціальної згуртованості, наприклад виділення часу для взаємодії на роботі та під час відпочинку; підведення підсумків після важких змін; спільна діяльність у неробочий час; спільні зони зустрічей, а також час і простір для спільних заходів; і зони відпочинку, такі як тренажерні зали або зони відпочинку. Соціальна підтримка з боку товаришів по команді сприяла психологічному капіталу, а підтримка на робочому місці була єдиним робочим ресурсом,

негативно пов'язаним із гострою. Останні дослідження показали, що коли тиск часу був низьким, підтримка не мала значення, але при середньому та високому рівнях тиску часу працівники, які мали більше підтримки, відчували значно нижчий рівень хронічної втоми, а також меншу потребу у відновленні між змінами. Крім того, підтримка не вплинула на високий рівень вимог до пильності, але при низькому та середньому рівнях вимог до пильності працівники з низькою соціальною підтримкою повідомляли про більше проблем зі сном [4].

Лише меншість учасників згадувала про міжособистісні стосунки як про джерело незадоволеності роботою, а рівень знуцань і агресивних дій на робочому місці в цілому був низьким, але про це частіше повідомляли працівники з нижчим рівнем освіти. Учасники якісного дослідження повідомили, що постійно змінювані стосунки в екіпажі були стресовими. Зокрема, негативними сторонами їхніх команд були спілкування з людьми з різних культур та мовні бар'єри. Наявність людей різного віку, рівня освіти та національності на борту іноді призводила до різних поглядів на те, як потрібно керувати роботою та як приймати рішення та повідомляти про них.

Багато учасників різних досліджень вважали, що їхня середня тривалість перебування на борту була надмірною, і що умови роботи та життя можна було б покращити, скоротивши перебування на борту. Одне довготривале дослідження показало, що психічне здоров'я значно погіршилося після тривалої подорожі, тоді як соматизація, тривожність і параноя зросли, тоді як тривалі періоди перебування в морі передбачають втому (але не якість сну). Коротша тривалість перебування на борту (наприклад, два місяці) була значною мірою пов'язана з вищою задоволеністю роботою та життям і кращим психічним здоров'ям. Однак інші дослідження не виявили зв'язку між тривалістю перебування в морі та відчуттям стресу або емоційне виснаження [5].

Враховуючи те, що працівники водного транспорту постійно перебувають під впливом таких факторів, як соціально-психологічні фактори (постійна готовність до виконання професійних обов'язків, монотонність професійної діяльності, дефіцит інформації, групова ізоляція та самотність, зниження рухової активності, додаткові загрози здоров'ю та навіть життю в окремих регіонах світу), природні умови (зміна погодних та кліматичних умов, зміна часових поясів, бортова та кількова хитавиця), виробничі умови (шум та вібрація, електромагнітне випромінювання, хімічне забруднення повітря), цілком очевидно, що створення безпечних і здорових умов праці, мінімізація негативного впливу виробництва на здоров'я та життя працівників водного транспорту задля безпеки судноплавства є актуальним питанням у наш час [6].

За даними Управління безпеки на транспорті та технічного регулювання Міністерства інфраструктури України більшість нещасних випадків на водному транспорті, а це близько 80%, стається через організаційні недоліки охорони праці. Однією з поширених причин нещасних випадків на водному транспорті є недостатня кількість членів екіпажу під час рейсу. Поступове скорочення чисельності екіпажів суден призводить до зростання відповідальності та ускладнення функцій, виконуваних судовими фахівцями, що у свою чергу призводить до накопичення втоми працівників [7].

Стурбованість питанням втомленості моряків викликала прийняття спеціальної Резолюції Міжнародної морської організації А.772(18) «Фактори втомленості при комплектуванні суден екіпажами та забезпечення безпеки», згідно якої, втомленість характеризується як зниження продуктивності праці людини, зниження фізичних та розумових здібностей та погіршення здатності робити обґрунтовані висновки. Одним з ефективних засобів вирішення проблеми накопичення втоми працівників водного транспорту має стати визначення та перевірка наявності мінімального складу екіпажу залежно від призначення та розмірів судна.

Важливість комплектації суден екіпажу підтверджена положеннями Конвенції Про мінімальні норми на торговельних судах №147, в якій зазначено, що кожна держава повинна мати законодавство та правила, які встановлюють норми безпеки для зареєстрованих на його території суден, включаючи норми відносно кваліфікації, тривалості робочого часу і комплектації екіпажу з метою забезпечення безпеки для життя на борту судна [8].

Будь-яке судно має бути очолене капітаном і офіцерами відповідної кваліфікації у сфері судноводіння, навігації, зв'язку, суднових машин і устаткування, а екіпаж за кваліфікацією та чисельністю має відповідати типу, розмірам і устаткуванню судна [9].

Наявність на борту судна необхідної кількості членів екіпажу впливає на виконання вимог стосовно дотримання робочого часу, недопущення перевантаження членів екіпажу судна роботою, надання належного відпочинку. Раціональне поєднання робочого часу з часом відпочинку дає змогу ефективно використовувати здатність людини до продуктивної праці, відтворювати фізичні та психологічні характеристики працівника, а також комплексно застосовувати виробничі потужності.

Диференціація правового регулювання робочого часу і часу відпочинку працівників водного транспорту здійснюється за трьома підставами: 1) режим роботи судна; 2) особливості конструкції судна; 3) характер трудових функцій плавскладу [10].

Відповідно до ст. 50 Кодексу торговельного мореплавства України мінімальний склад екіпажу, за якого дозволяється вихід судна в море, залежить від району плавання, призначення та типу судна відповідно до чинного законодавства України. Йдеться не про зменшений «екстремальний» склад, а про екіпаж, розрахований для нормальної експлуатації судна з повним дотриманням усіх вимог з безпеки судноплавства, трудового законодавства, а також з урахуванням ризиків, пов'язаних з людським фактором.

Згідно з Порядком визначення мінімального складу екіпажу судна, затвердженим Наказом Міністерства інфраструктури України №575, мінімальним складом є мінімальна кількість осіб командного складу та суднової команди, які можуть у будь-який час експлуатації гарантувати безпечне управління судном [11;12].

Ураховуючи, що виконання додаткової роботи у вільний від основної роботи час вимагає від працівника водного транспорту більшого навантаження (фізичного, морального, психічного), обмеження сумісництва потребує чіткого врегулювання шляхом включення додаткових положень до змісту колективних договорів, як це передбачено у ч. 2 ст. 21 Кодексу законів про працю України. Для того, щоб

тривалість роботи екіпажу не перевищувала безпечно допустимого рівня, власник судна має визначити перелік необхідних і достатніх функцій, які повинні виконуватися на судні під час майбутнього рейсу, функції, які можна суміщати за умов нормальної експлуатації судна та за передбачених аварійних ситуацій на судні, а також мінімальний склад екіпажу, необхідний для безпечного виконання функцій за сумісництвом.

За вимогами, що пред'являються до стану здоров'я і психофізіологічного стану працівників, залежно від важливості функцій, що виконуються ними на судні, особи, які проходять медичний огляд, об'єднуються у професійні групи: до першої групи віднесено осіб, професійна діяльність яких не пов'язана з питаннями безпеки (слюсарі, токарі, дизелісти самохідних кранів, кочегари тощо), до другої групи осіб, які виконують рішення, пов'язані з безпекою під час плавання (електрики, машиністи, маячні служники тощо), до третьої групи – осіб, які приймають рішення, пов'язані з безпекою під час плавання (капітани, помічники капітанів, механіки, помічники механіка та ін.). В основі такого розподілу фахівців водного транспорту за професійними групами – ступінь соціальної небезпеки їхньої професійної діяльності (ст. 31 «Обов'язкові медичні огляди» Основ законодавства України про охорону здоров'я) [13].

Як зазначає Н. Орлова у своєму досліді, недоліком правового регулювання у сфері охорони праці на річковому та морському транспорті є відсутність системного медичного спостереження за працівниками, які повертаються з рейсів: не здійснюється оцінка стану здоров'я працівників-моряків, немає динамічного спостереження за зміною їхнього здоров'я [14].

Конвенцією Про зобов'язання судновласників у разі хвороби, травми або смерті моряків № 55 передбачено, що судновласник несе зобов'язання у разі хвороб і травм, які виникли в період між датою початку роботи і датою закінчення строку найму, та смерті, яка сталася через таку хворобу або травму, однак при цьому національним законодавством може передбачатись, що судновласники не є відповідальними за хворобу або смерть, безпосередньо спричинену хворобою, якщо особа, яка влаштовується на роботу, відмовилася пройти медичний огляд на момент зарахування на службу. Таке положення суперечить нормам Конвенції про медичний огляд моряків № 73, згідно з якою ніхто не може бути прийнятий на роботу на судно, якщо не надали посвідки, що підтверджує придатність до роботи [15].

Крім того, положення ст. 46 Кодексу законів про працю України також видаються суперечливими: роботодавець може відсторонити від роботи працівника, який ухиляється від проходження обов'язкового медичного огляду у встановленому порядку; при цьому відсторонення не є обов'язком роботодавця – лише правом, що представляється неправильним, особливо у галузі водного транспорту.

Особливості трудової діяльності осіб у період рейсів насамперед зумовлені необхідністю тривалого перебування на борту водного транспортного засобу. Фактори, що діють на організм працівників протягом всього періоду рейсу в умовах обмеженого об'єкта (судна), можуть викликати зміни в стані їхнього здоров'я. Одним із найбільш специфічних факторів впливу є зміна природно-кліматичних умов під час рейсів у різні точки світу [16].

Останніми роками небезпечного поширення набуло міжнародне піратство, результатом якого є загроза потрапляння у піратський полон. Сьогодні піратство являє реальну небезпеку для мореплавання й насамперед посягає на права кожної людини на життя, свободу й особисту недоторканість.

Відповідно до ст. 101 Конвенції Організації Об'єднаних Націй з морського права піратством є будь-яка з перерахованих нижче дій: а) будь-який неправомірний акт насильства, затримання або будь-який грабіж, який вчиняється в особистих цілях екіпажем чи пасажиром судна або літального апарату, що знаходяться у приватній власності, і спрямований у відкритому морі проти іншого судна або проти осіб чи майна, які перебувають на його борту; проти будь-якого судна, осіб або майна в місці поза юрисдикцією будь-якої держави; б) будь-який акт добровільної участі у використанні будь-якого судна за обставин, в силу яких судно є піратським судном.

Міжнародно-правова позиція України у сфері боротьби з піратством виражена у її активній участі в ратифікації чинних міжнародно-правових актів, в імplementації в українське законодавство положень відповідних міжнародно-правових актів. Так, Україною була ратифікована Міжнародна конвенція з охорони людського життя на морі (СОЛАС-74), яка є, мабуть, найважливішою з усіх міжнародних угод з безпеки торговельного мореплавства, Конвенція Про боротьбу з незаконними актами, спрямованими проти безпеки морського судноплавства, Протокол про боротьбу з незаконними актами, спрямованими проти безпеки стаціонарних платформ, що розташовуються на континентальному шельфі. У грудні 2002 року був прийнятий Міжнародний кодекс з охорони суден та портових засобів (Кодекс ОСПЗ) тощо. Кодекс торговельного мореплавства України також містить положення, згідно з якими капітан у разі небезпеки зобов'язаний застосовувати всі необхідні і можливі заходи для порятунку людей, що перебувають на судні, і не допустити захоплення судна, документів, вантажу й іншого майна, що на ньому знаходяться (ст. 62). Статтею 258 Кримінального кодексу України передбачено відповідальність за здійснення терористичного акту. Крім того, 6 вересня 2017 року в Україні утворено Морську адміністрацію (Державна служба морського і внутрішнього водного транспорту та судноплавства України) – центральний орган виконавчої влади України, який реалізує державну політику у сферах морського та річкового транспорту, торговельного мореплавства, судноплавства на внутрішніх водних шляхах, навігаційно-гідрографічного забезпечення мореплавства, а також у сфері безпеки на морському та річковому транспорті.

Висновки. Таким чином, можна зробити висновки, що специфіка роботи на річковому та морському транспорті характеризується не тільки необхідністю правового регулювання важких та специфічних умов праці, а і дотримання належної безпеки під час виконання своїх трудових обов'язків як члена екіпажу на судні. Основною проблемою на водному транспорті є недостатнє правове регулювання охорони трудової діяльності моряків, як під час виконання трудових обов'язків, так і за межами роботи. Недоліком правового регулювання у сфері охорони праці на річковому та морському транспорті є відсутність системного медичного спостереження за працівниками, які повертаються з рейсів: не здійснюється оцінка

стану здоров'я працівників-моряків, немає динамічного спостереження за зміною їхнього здоров'я. Україна використовує світовий досвід організації роботи з покращення умов та безпеки праці на водному транспорті, вдосконалює національну нормативно-правову базу з питань охорони праці, однак окремі положення законодавства потребують взаємоузгодження та доопрацювання.

Навіть національна правова база боротьби з морським піратством потребує удосконалення. На практиці, як правило, боротьба з піратством обмежується звільненням заручників шляхом викупу, що спричиняє нові злочини.

ЛІТЕРАТУРА

1. Безлуцька О. Ментальне здоров'я суднового офіцера як вагома складова частина безпеки судноплавства. *Наукові праці Міжрегіональної академії управління персоналом*. Психологія. 2021, №3 (52), 15–19. URL: <https://doi.org/10.32689/maup.psych.2021.3.2>
2. Samantha K. Brooks, Neil Greenberg. Mental health and psychological well-being of maritime personnel: a systematic review. *BMC Psychology*, 2022, V.10, №139. URL: <https://doi.org/10.1186/s40359-022-00850-4>
3. Сапов И. А. Некоторые физиологические и медицинские аспекты адаптации. *Морской медицинский журнал*, 1998. № 6, С. 24–29.
4. В.В. Жеглов, Ф.М. Семёнов, В.И. Касаткин. Повышение устойчивости моряков к заболеваниям. *Морской сборник*, 1984. 2012. № 7, С. 47–51.
5. Симоненко В.Б., Александров А.С., Дулин П.А. и др. О структуре заболеваемости патологией органов пищеварения у моряков. *Военно-медицинский журнал*. 2008. Т. 329, № 4. С. 58.
6. Петрова Т.Б., Бичкаев Я.И., Бичкаева Ф.А., Власова О.С., Третьякова Т.В., Жилина Л.П. Изменение параметров углеводородного обмена у плавсостава северного водного бассейна. *Экология человека*. 2009, No. 8., P. 12–18. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmenenie-parametrov-uglevodnogo-obmena-u-plavsostava-severnogo-vodnogo-basseyna>
7. Мацевич Л.М. Охрана здоровья моряков. М.: Транспорт, 1986. 200 стр.
8. Конвенція МОП 147 про мінімальні норми на торговельних суднах 1976 року. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/993_052
9. ЗАКОН УКРАЇНИ Про ратифікацію Конвенції Організації Об'єднаних Націй з морського права 1982 року та Угоди про імплементацію Частини XI Конвенції Організації Об'єднаних Націй з морського права 1982 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/728-14>
10. Міжнародна конвенція про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 року. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_053
11. Конвенція про зобов'язання судновласників у разі хвороби, травми або смерті моряків №55 URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/993_156
12. Кодекс торговельного мореплавства України URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/176/95-вр>

13. Наказ Міністерства інфраструктури України № 575 від 10.11.2014 Про затвердження Порядку визначення мінімального складу екіпажу судна. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1507-14>
14. Орлова Н. Особливості правового регулювання охорони праці на водному транспорті. Підприємництво, господарство і ПРАВО. 2020, №6. 78-85. URL: <https://doi.org/10.32849/2663-5313/2020.6.15>
15. Конвенція про медичний огляд моряків №73 URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/993_129
16. Наказ Міністерства охорони здоров'я України №347 від 19.11.96 р. Про затвердження Правил визначення придатності за станом здоров'я осіб для роботи на судах. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0108-97>

REFERENCES

1. Bezlutska O. (2021) Mental health of a ship's officer as an important component of shipping safety. [Mentalne zdorovia sudnovoho ofitsera yak vahoma skladova chastyna bezpeky sudnoplavstva. Naukovi pratsi Mizhrehionalnoi akademii upravlinnia personalom.] *Scientific works of the Interregional Academy of Personnel Management. Psychology*, 3(52). Retrieved from <http://journals.maup.com.ua/index.php/psychology/article/view/1180/1680>
2. Samantha K. Brooks, Neil Greenberg (2022) Mental health and psychological well-being of maritime personnel: a systematic review. [Psykhichne zdorovia ta psykholohichne blahopoluchchia morskoho personalu: systematychnyi ohliad]. *BMC Psychology*, 10(139.) Retrieved from <https://doi.org/10.1186/s40359-022-00850-4>
3. Sapov I. A. (1998) Some physiological and medical aspects of adaptation. [Deiaki fiziolohichni ta medychni aspekty adaptatsii]. *Marine Medical Journal*, 6. 24–29.
4. Zheglov V.V., Semenov F.M., Kasatkin V.I. (1984) Increasing the resistance of sailors to diseases. [Povyshenie ustojchivosti moryakov k zabolevaniyam]. *Maritime collection*. 2012, 7. 47–51.
5. Symonenko V.B., Aleksandrov A.S., Dulin P.A. (2008) About the structure of the pathology of digestive organs in sailors. [O strukture zabolevaemosti patologiej organov pishevareniya u moryakov]. *Military medical journal*. 329 (4), 58.
6. Petrova T.B. (2009) Changes in the parameters of carbohydrate exchange in the aquatic composition of the Northern Water Basin. [Izmenenie parametrov uglevodnogo obmena u plavsostava Severnogo vodnogo bassejna]. *Human ecology*, 8.
7. Maceevich L.M. (1986). Health care of sailors. [Okhorona zdorovia moriakiv]. 200.
8. ILO Convention 147 on Minimum Standards for Merchant Ships of 1976: [Konventsiiia pro minimalni normy na torhovelnykh sudnakh 1976 roku] Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/993_052

9. United Nations Convention on the Law of the Sea: [Konventsiiia z morskoho prava] Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/728-14>
10. International Convention on Training and Certification of Seafarers and Watchkeeping of 1978: [Konventsiiia pro pidhotovku i dyplomuvannia moriakiv ta nesennia vakhty 1978 roku] Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_053
11. Convention on the Obligations of Shipowners in the Event of Illness, Injury or Death of Seamen №55: [Konventsiiia pro zoboviazannia sudnovlasnykiv u razi khvoroby, travmy abo smerti moriakiv №55] Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/993_156
12. Merchant Shipping Code of Ukraine: [Kodeks torhovelnoho moreplavstva Ukrainy] Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/176/95-вр>
13. On the approval of the Procedure for determining the minimum composition of the ship's crew: [Pro zatverdzhennia Poriadku vyznachennia minimalnogo skladu ekipazhu sudna] Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1507-14>
14. Orlova N.(2020). Peculiarities of legal regulation of labor protection on water transport. [Osoblyvosti pravovoho rehuliuвання okhorony pratsi na vodnomu transporti.] *Enterprise, economy and law*. 6, 78–85. Retrieved from <https://doi.org/10.32849/2663-5313/2020.6.15>
15. Convention on Medical Examination of Seafarers № 73: [Konventsiiia pro medychnyi ohliad moriakiv №73] Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/993_129
16. On the approval of the Rules for determining the fitness of persons for work on ships based on their state of health: [Pro zatverdzhennia Pravyly vyznachennia prydatnosti za stanom zdorovia osib dlia roboty na sudnakh] Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0108-97>

**МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ЗМІНИ РЕЖИМУ ТЕЧІЇ РІДИНИ
В СУДНОВОМУ ТРУБОПРОВОДІ ПРИ ПІДГОТОВЦІ
МОРСЬКИХ ІНЖЕНЕРІВ**

С.О. Яремчук¹, І.З. Маслов²

¹к. т. н., доцент кафедри управління в транспортній галузі,
Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», Ізмаїл,
Одеська область, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-6736-1471

²к. т. н., доцент, завідувач кафедри судових енергетичних установок і систем,
Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», Ізмаїл,
Одеська область, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-1759-6077

Анотація

Вступ. Одна із проблем безпеки судноплавства полягає в неправильній оцінці членами екіпажу швидкості та сили фізичних явищ, що спричиняють аварійну ситуацію. Не менш значущими для безпеки судна є проблеми надійної експлуатації суднових трубопроводів. Агресивний вплив різновидів суднового палива, та режиму течії рідини призводять до руйнування поверхонь труб, зношення та вібрації трубопроводів та арматури, що обґрунтовує актуальність досліджень фізичних процесів в області молекулярної фізики та механіки суцільних середовищ. **Метою** роботи є розвиток фахових компетентностей морських інженерів шляхом моделювання динаміки зміни режиму течії рідини в судновому трубопроводі із застосуванням системно-структурного підходу та інформаційних технологій.

Результати. Розроблені структурні та функціональні схеми системи суднових трубопроводів. Розроблена покрокова методика дослідження руху рідини у прямих гладких циліндричних трубах. На лабораторному стенді НТЦ-11.38 «ГІДРАВЛІКА, ГІДРОМАШИНИ І ГІДРОПРИВОДИ» здобувачами освіти проведено експеримент, виконано розрахунки та візуалізацію результатів. Отримано графічне відображення динаміки зміни швидкості течії рідини. Встановлені значення, за яких турбулентні вихори рідини можуть призвести до виникнення явища гідродинамічної кавітації та кавітаційної корозії. **Висновки.** В роботі застосований інтегрований підхід до вивчення освітнього компоненту «Фізика», який поєднує знання та навички в області фізики, методології дослідження, та інформаційних технологій. Залучення курсантів до науково-дослідної роботи дало можливість розвинути наступні компетентності: практичні навички класифікації сутностей, навички роботи з лабораторним обладнанням, здатність застосовувати аналітичні та експериментальні методи для вирішення складних задач, та інформаційні технології для обчислень, здатність аналізувати результати та обґрунтовувати висновки дослідження.

Ключові слова: системно-структурний підхід, молекулярна фізика, інформаційні технології, судові трубопроводи, турбулентний режим.

THE MODELLING OF DYNAMICS
OF FLUID FLOW REGIME CHANGE IN THE SHIP PIPELINE DURING
THE TRAINING OF MARINE ENGINEERS

S.O. Yaremchuk¹, I.Z. Maslov²

¹PhD, Associate Professor at the Department of Transport Management,
Danube Institute of National University "Odessa Maritime Academy",
Izmail, Odesa region, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-6736-1471

²PhD, Associate Professor, Head of the Department of Ship Power Plants and Systems,
ORCID ID: 0000-0003-1759-6077

Summary

Introduction. One of the many safety problems of maritime shipping is the incorrect assessment by crew members of the vessel of the speed and strength of physical phenomena that cause an emergency. No less significant are the problems of reliable operation of numerous ship pipelines. Aggressive influence of marine fuel varieties and turbulent fluid flow mode lead to destruction of pipe surfaces, wear and vibration of pipelines and valves. These factors justify the relevance of studies of physical processes in the field of molecular physics and mechanics of continuous environments. **The purpose** of the work is the development of the professional competencies of marine engineers by the modeling the dynamics of changes in the fluid flow regime in the ship pipeline using a system-structural approach and information technologies. **Results.** Structural and functional diagrams of the ship pipeline system have been developed. A step-by-step method for studying the movement of liquid in straight smooth cylindrical pipes has been developed. At the laboratory stand "HYDRAULICS, HYDRAULIC MACHINES AND HYDRAULIC DRIVES" cadets conducted an experiment, calculated and visualized the results. The graphic display of fluid flow mode change dynamics is obtained. Calculated values at which turbulent liquid flows can lead to the occurrence of the phenomenon of the hydrodynamic cavitation and the cavitation corrosion. **Conclusions.** The work uses an integrated approach to the study of the educational component "Physics," which combines the knowledge and skills in the field of physics, the research methodology, and information technologies. The involvement of cadets in scientific and research work made it possible to develop the following competencies: practical skills in the classification of entities, skills in working with laboratory equipment, the ability to use analytical and experimental methods to solve complex problems, and information technologies for data processing, the ability to analyze information, formulate and substantiate the conclusions of the study.

Key words: system-structural approach, molecular physics, information technology, ship pipelines, turbulent mode.

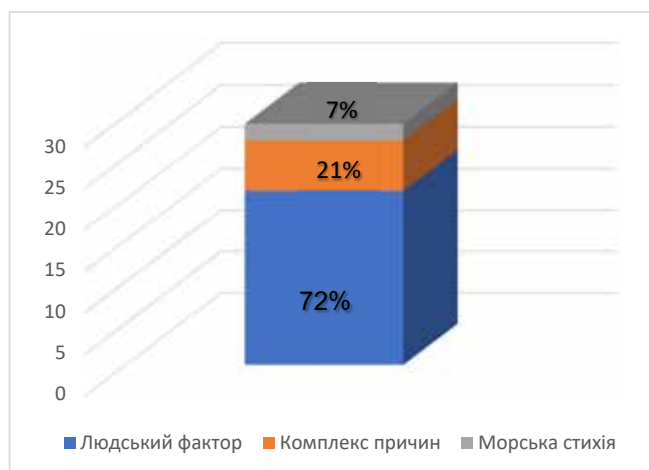
Вступ. Для здобувачів вищої освіти за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт важливим аспектом фахової підготовки є отримання знань та розуміння фізичних понять, законів, теорій, явищ та процесів, що застосовуються у сфері морської інженерії, та лежать в основі суднових систем. Невід'ємною складовою підготовки є набуття умінь користування інструментами, приладами, лабораторними установками та стендами для вимірювання фізичних величин, та набуття практичних навичок застосування сучасного

програмного забезпечення, як для розрахунків, так і для візуалізації отриманих результатів.

Постановка проблеми. Недостатні знання законів фізики морськими фахівцями є передумовою порушень правил безпеки та основною причиною численних морських катастроф та аварій. Результати аналізу тридцяти найбільших катастроф морських суден у ХХ столітті, описаних в роботі [1], зображені на *діаграма 1*, і відображають найпоширенішу причину катастроф – людський фактор (72%), або поєднання людського фактору з іншими причинами (21%). З опису та аналізу аварійних ситуацій відомо, що найчастіше це неправильна оцінка членами екіпажу судна динаміки та потужності фізичних явищ, які спричинюють аварійну ситуацію, що в результаті призводить до численних людських жертв, екологічних катастроф та великих фінансових втрат.

Як приклад, за інформацією з відкритих джерел [2], можна описати зіткнення пасажирського судна «Адмірал Нахімов» та балкера «Петро Васев» 31 серпня 1986 року в Цемеській бухті морського порту Новоросійськ. Після фатального зближення суден на небезпечно коротку відстань, та команди від капітана балкера «повний назад», незважаючи на те, що гребний гвинт вже працював на задній хід, балкер за інерцією продовжував рухатись вперед, і врізався в середину правого борту пасажирського судна, яке теж за інерцією продовжувало рухатись вперед, розвертаючи балкер, і збільшуючи розмір пробоїни. Через 8 хвилин судно повністю пішло під воду. Катастрофа мала трагічні наслідки, і забрала життя 359 пасажирів та 64 членів екіпажу.

Наведений приклад демонструє одну із проблем безпеки судноплавства, яка полягає в неправильній оцінці членами екіпажу судна швидкості та сили фізичних явищ, що спричинюють аварійну ситуацію. Не менш важливими є проблеми надійної експлуатації на судні численних трубопроводів. Турбулентні потоки рідини призводять до руйнування внутрішніх поверхонь труб, зношення та вібрації трубопроводів та арматури. Використання різновидів суднового палива створює нові ризики для надійної та безпечної експлуатації судових трубопроводів,



Діаграма. 1. Діаграма, що відображає відсотки причин тридцяти найбільших катастроф морських суден у ХХ столітті

тому дослідження фізичних процесів в області молекулярної фізики, гідростатики та гідродинаміки є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Трубопровід – це сукупність труб і різноманітної арматури (з'єднувальна, розгалужувальна, запірна тощо), призначена для транспортування різних речовин [3]. Під судновою трубопровідною системою розуміють сукупність численних трубопроводів, механізмів, пристроїв, установок, апаратів та приладів управління і контролю, призначених для виконання конкретних функцій.

Найпоширеніша проблема суднових трубопроводів – розгерметизація, яка відбувається за низки причин: руйнування поверхонь труб, зношення та вібрація трубопроводів та трубопровідної арматури, понаднормове збільшення тиску, замерзання рідини при низьких температурах, корозія труб та арматури внаслідок впливу агресивних середовищ.

Проблеми експлуатації суднових трубопроводів, що виникають через їх пошкодження внаслідок впливу агресивних середовищ, створюваних різновидами суднового палива, були розглянуті у роботах [4–6]. В роботі [4] було виконано аналітичний огляд технологічних проблем, пов'язаних з використанням водню в якості суднового палива. Транспортування великих об'ємів водню пов'язане з технологічними труднощами у зв'язку з дифузією водню крізь тверді матеріали та подальшим їх скрихненням. Водень спричинює руйнування сталі, це підвищує експлуатаційні витрати та об'єми витоків. Бункерування судна воднем наразі дуже проблематично через велику вартість інфраструктури. Впровадження водневих паливних систем на судах потребуватиме в майбутньому величезних інвестицій в інфраструктуру для транспортування, зберігання та розподілення водню.

В роботі [5] були проаналізовані фізичні та хімічні властивості суднового палива метанолу, та його вплив на суднові трубопроводи. Метанол – це конкурентоспроможне за вартістю та доступне за інфраструктурою морське паливо, він не потребує зберігання в криогенному стані, не потребує трубопроводів високого тиску, як для водню. Це спрощує його бункерування в існуючій інфраструктурі. Такі хімічні властивості метанолу, як невисока корозійна агресивність, запобігають передчасному зношенню устаткування та трубопроводів. Однак висока токсичність метанолу створює серйозну небезпеку для людини в разі його витоків. Метанолові суднові двигуни викидають в атмосферу на 90% менше шкідливих речовин. В даний час використання метанолу в якості екологічно чистого суднового палива активізується завдяки наступним факторам: здатності відповідати стандарту Tier III без додаткової обробки вихлопних газів; ефективним можливостям двопаливних двигунів; низькій вартості інфраструктури; збільшення виробництва та продажу метанолу на світовому ринку.

В роботі [6] були розглянуті проблеми, пов'язані з транспортуванням по судновому трубопроводу ще одного різновиду суднового палива – біодизелю (БД). БД має високу гігроскопічність і активно абсорбує вологу, тому є сприятливим середовищем для розмноження мікроорганізмів, які можуть призвести до закупорки фільтрів і трубопроводів, корозії паливної апаратури і виникнення відкладень біологічного походження в паливній системі. При низьких температурах

біопаливо втрачає рухливість, стає гелеобразним, кристалізується, що призводить до забивання фільтрів, трубопроводів, утруднення перекачування насосами. Перелік усіх несправностей суднової енергетичної установки (СЕУ) при використанні БД, та рекомендації щодо уникнення негативного впливу БД та ефективної експлуатації СЕУ потребують аналізу в окремому дослідженні.

Для ефективної експлуатації як діючих суднових трубопроводів, так і при конструюванні нових, фахівцям морської інженерії необхідні міцні знання класичних законів молекулярної фізики, механіки суцільних середовищ, гідростатики та гідродинаміки. Це закони Паскаля та Архімеда, рівняння Бернуллі, трубки Піто, формул Ньютона, Пуазейля та Стокса, описані у ґрунтовному навчальному посібнику [7]. Формули Ньютона, Пуазейля та Стокса характерні для *ламінарного* режиму течії рідини. При зростанні швидкості течії рідини характер течії істотно змінюється – у потоці рідини утворюються вихорі, шари рідини перемішуються між собою і сили опору різко зростають [7, с. 58]. Відбувається перехід від *ламінарного* режиму течії до *турбулентного*. Фізичні явища, пов'язані з режимом течії рідини та його змінами, здійснюють значний вплив як на рух судна, так і на експлуатацію суднових трубопроводів [8].

Суднові трубопровідні системи поділяються на дві основні групи: 1) загальносуднові трубопровідні системи; 2) трубопровідні системи суднових енергетичних установок. Системи цих двох груп можна класифікувати: 1) за родом транспортованої речовини; 2) за характером виконуваних функцій [3, 8]. Оскільки суднові системи складаються з багаточисленних трубопроводів, поділяються на групи, та різняться за ознаками, для отримання повної цілісної картини всієї системи є доцільним використання системно-структурного підходу – на пряму методології досліджень, що полягає у вивченні об'єкта як цілісної множини елементів у сукупності відношень і зв'язків між ними, тобто розгляд об'єкта як системи [9].

В той же час науково – дослідницька робота в області фізики передбачає необхідність розрахунків значень фізичних величин та їх похибок із заданою точністю, та графічного відображення отриманих результатів, що вимагає використання сучасних інформаційних технологій, які значно спрощують та пришвидшують процеси обчислення та візуалізації. Тому дослідження фізичних явищ в області молекулярної фізики та механіки суцільних середовищ із застосуванням системно-структурного підходу та інформаційних технологій є актуальною науково-технічною та педагогічною задачею, і обумовлює мету роботи.

Мета та задачі роботи. *Метою роботи* є розвиток фахових компетентностей морських інженерів шляхом моделювання динаміки зміни режиму течії рідини в судновому трубопроводі із застосуванням системно-структурного підходу та інформаційних технологій.

Для досягнення мети роботи необхідно виконати *наступні задачі*:

1. З використанням системно-структурного підходу розробити структурну та функціональну схеми системи суднових трубопроводів;
2. Розробити покрокову методику дослідження руху рідини у прямих гладких циліндричних трубах з урахуванням особливостей лабораторного стенду, та провести вимірювання фізичних величин;

3. З використанням інформаційних технологій виконати розрахунки, візуалізацію та аналіз отриманих результатів, сформулювати висновки, та визначити напрямки подальших досліджень.

Виклад основного матеріалу дослідження. *Розробка структурної та функціональної схеми системи суднових трубопроводів.* Суднові трубопровідні системи трубопровідні поділяються на дві основні групи:

1) загально суднові трубопровідні системи; 2) трубопровідні системи суднових енергетичних установок. Всі системи цих двох груп можна класифікувати: 1) за родом речовини, яка переміщується по трубопроводу; 2) за характером виконуваних функцій, принципом дії і характером роботи. За родом речовини трубопроводи можуть транспортувати воду, повітря, пар, газ, нафтопродукти, хімічні речовини тощо.

Оскільки суднові трубопровідні системи складаються з багаточисленних трубопроводів, поділяються на групи, та різняться за ознаками, для отримання повної цілісної картини всієї системи доцільно використати системно-структурний підхід та побудувати багаторівневі класифікаційні структурні та функціональні схеми системи суднових трубопроводів. Це можливо зробити на основі огляду та аналізу робіт [3, 8], систематизації знань, та використання підсистеми SmartArt у текстовому процесорі MS Word. На рис. 1, 2, 3 показані класифікаційні багаторівневі структурні та структурно – функціональна схеми системи суднових трубопроводів, розроблені за участі здобувачів вищої освіти – курсантів Дунайського інститут Національного університету «Одеська морська академія» на практичному занятті з освітнього компоненту «Фізика».

На рис. 1 та 2 напівжирним шрифтом та голубим кольором позначена підсистема трубопроводу, досліджуваного курсантами на лабораторному занятті. Запропоновані схеми підлягають уточненню та доповненню курсантами при вивченні технічних дисциплін з експлуатації судна на наступних курсах навчання, однак дозволяють курсантам вже на першому курсі навчання: 1) отримати знання щодо структури, складу та функцій системи суднових трубопроводів; 2) розвивати компетентності щодо застосування системно-структурного підходу, як науково-дослідницької методології, яку вони зможуть в майбутньому використати в навчальних, професійних та наукових дослідженнях.

Розробка покрокової методики експериментального дослідження руху рідини у прямих гладких циліндричних трубах з урахуванням особливостей лабораторного стенду. **Об'єктом** експериментальної частини дослідження є трубопровід лабораторного стенду НТЦ-11.38 «ГІДРАВЛІКА, ГІДРОМАШИНИ І ГІДРОПРИВОДИ», використаний як прототип суднового трубопроводу.

Предметом є зміна динаміки руху рідини у прямих гладких циліндричних трубах. **Обладнання** стенду містить: два електродвигуни, три шестеренні насоси, аксіально-поршневий гідромотор, два гідроциліндри, шість гідро розподільників, та іншу направляючу та регулюючу апаратуру.

Інформаційно-вимірювальна система дозволяє вимірювати: витрати (три витратоміри інтегруючого типу); тиск (чотирнадцять манометрів і один вакуумметр); температуру робочої рідини (два термометри); час (два електронні секундоміри); швидкості вихідних ланок при поступальному та обертальному русі,

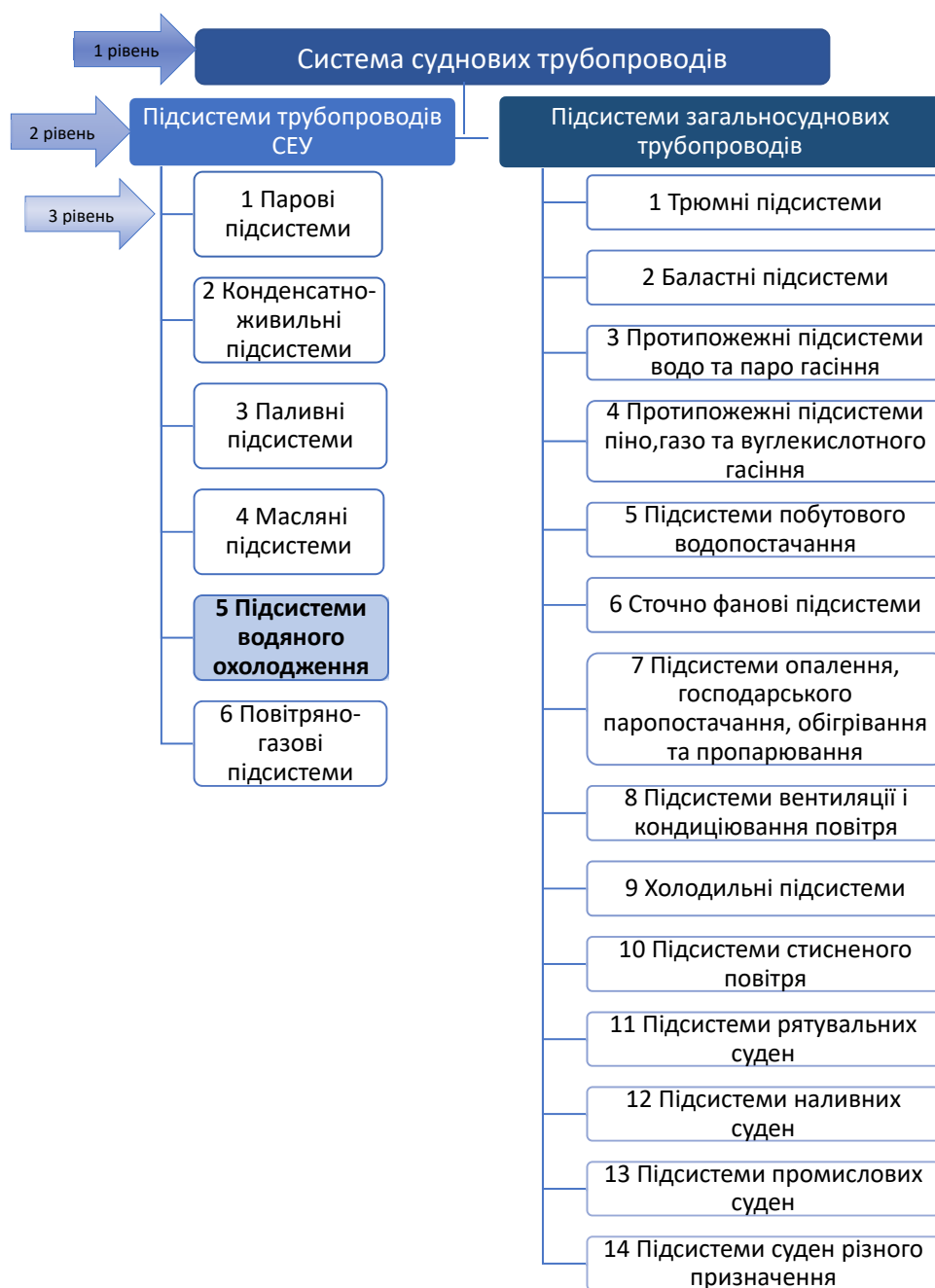


Рис. 1. структурна схема системи суднових трубопроводів

частоту обертання основного насоса; потужність, що підводяться до гідроприводу; корисну потужність на вихідних ланках.

Конструкція стенду. Конструктивно стенд виконаний у вигляді єдиного модуля з двостороннім базисом. На обох базисах стенду наведено схеми гідравлічні принципові відповідних підсистем: «Гідравліка» і «Гідромашини і гідроприводи». На бічній поверхні стенду розташовані загальна гідравлічна принципова

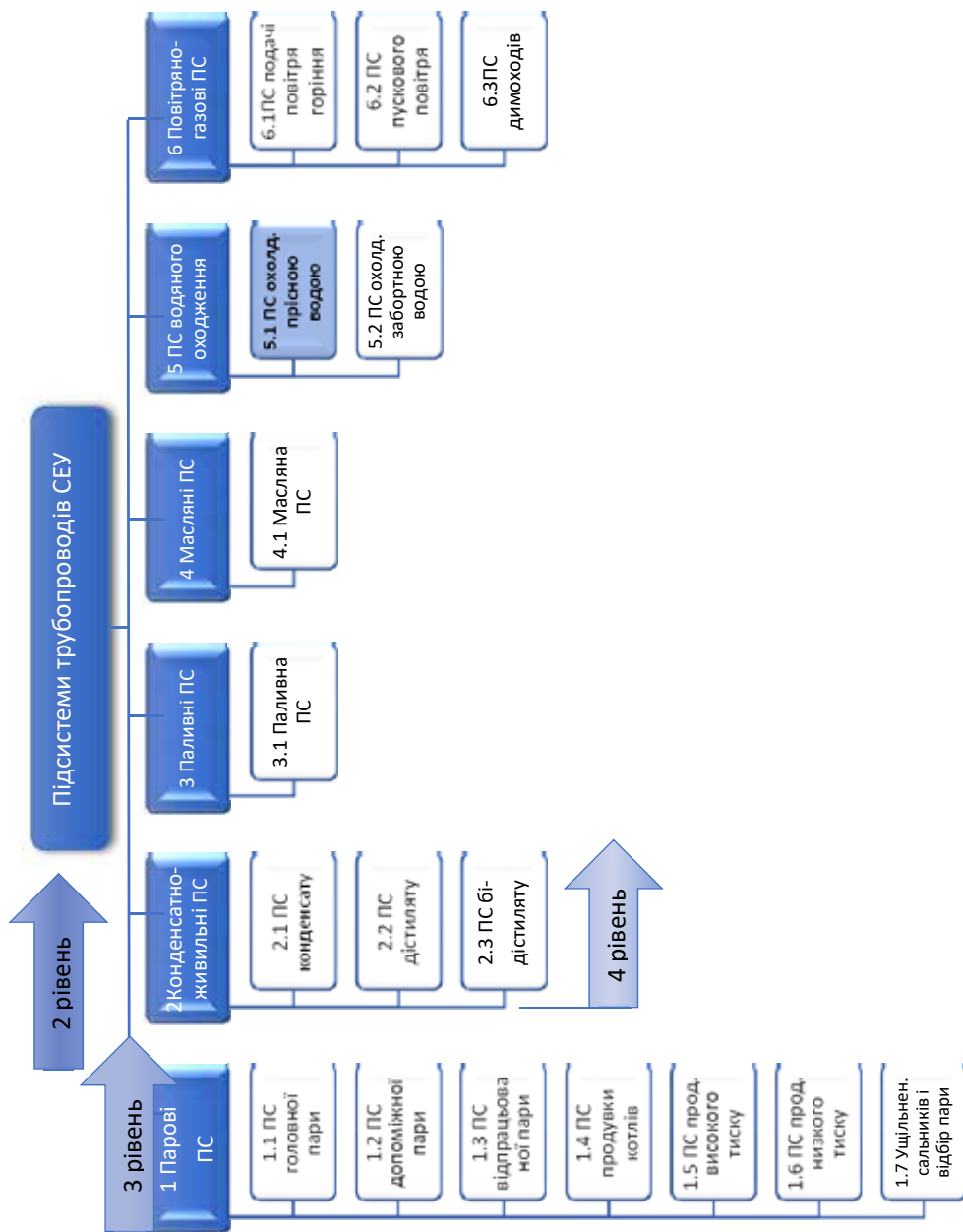


Рис. 2. Структурна схема підсистеми трубопроводів СЕУ

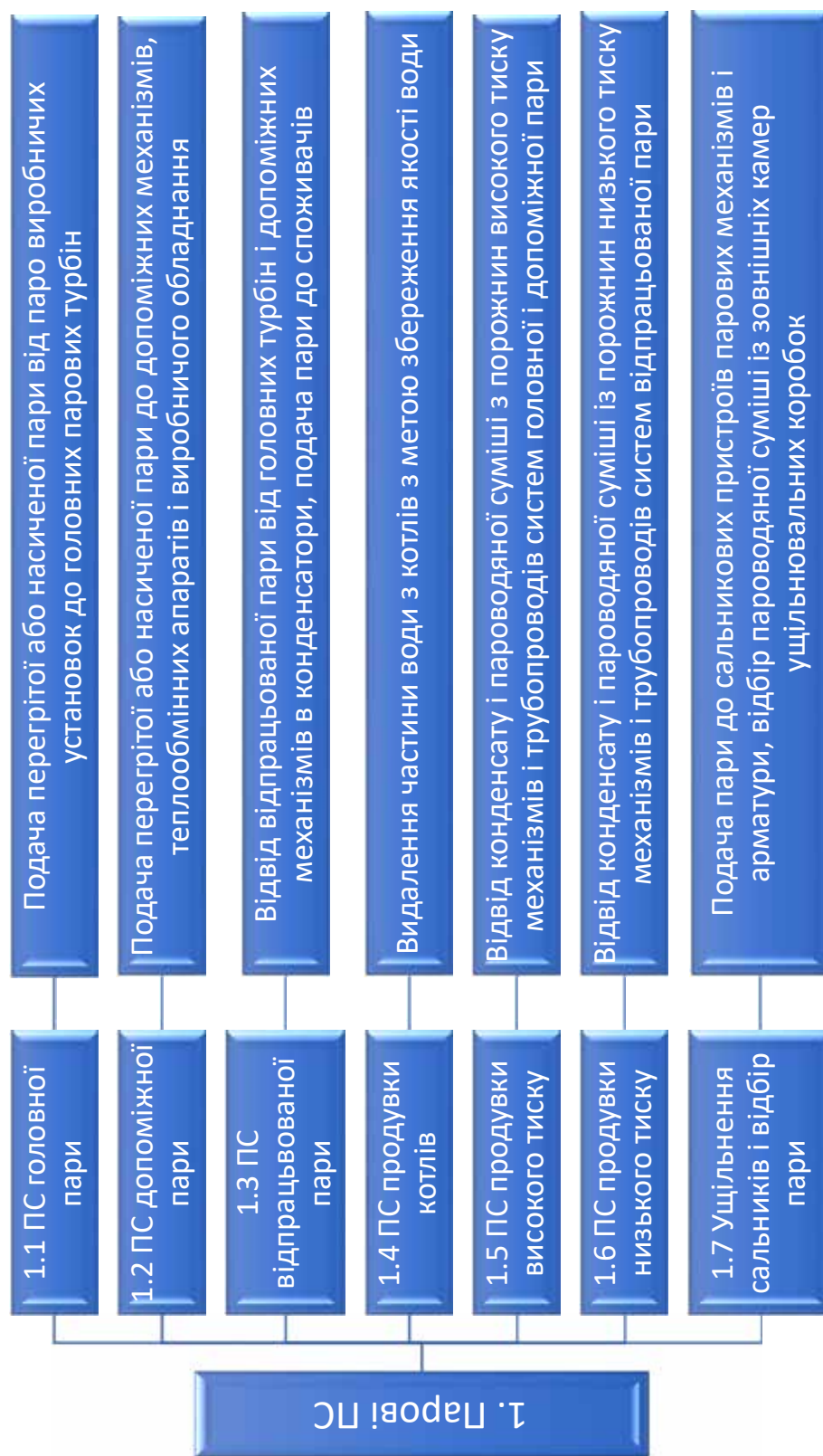


Рис. 6. Структурно-функціональна схема парової підсистеми системи суднових трубопроводів СЕУ

схема стенду, вимикачі електроживлення стенду з індикаторами включення фаз, та запобіжники.

Технічні характеристики стенду. Розподіл робочої рідини від основного насоса за базами стенду здійснюється за допомогою розподільника з ручним керуванням **Р1**. Напряга живлення 380 В, частота 50 Гц, напряга живлення електромагнітів гідро розподільників – 24 В (постійний струм). Напряга на кінцевих вимикачах **КВ1 і КВ2** – 12 В. Номінальна потужність стенду – 4,4 кВт.

В експерименті було досліджено трубопровід **абс** з встановленим у ньому дроселем **ДР1**. Конструктивні параметри трубопроводу: внутрішній діаметр – 8 мм, діаметр отвору дроселя **ДР1** – 3мм, довжини: **аб** = 450 мм, **бс** = 100 мм. На рис. 4 зліва зображено фронтальний вигляд лабораторного стенду, справа зображені курсанти Дунайського інститут Національного університету «Одеська морська академія» в процесі дослідження.

Методика дослідження, розроблена авторами, містить наступні кроки.

Крок 1. Провести зі здобувачами освіти первинний інструктаж з техніки безпеки при роботі з обладнанням з напругою живлення 380 В;

Крок 2. Увімкнути рукоятку розподільника **Р1** до положення I (верхнє);

Крок 3. Увімкнути включити електричне живлення стенду;

Крок 4. Увімкнути електродвигун **М1** (кнопка «Пуск»);

Крок 5. Увімкнути розподільник **Р2** тумблером до положення «Вкл»;

Крок 6. Дати можливість попрацювати стенду протягом 5 – 6 хвилин;



Рис. 4. Зовнішній вигляд лабораторного стенду, та курсанти в процесі дослідження

Крок 7. За допомогою електронного секундоміра виміряти час проходження певного обсягу робочої рідини через трубопровід **abc**. За допомогою витратоміру виміряти обсяг робочої рідини. За допомогою термометра виміряти температуру робочої рідини. Отримані дані занести в таблицю 1.

Крок 8. Вимірювання повторити не менше 10 разів при різних обсягах витратах рідини. Обсяги витрат змінюються за допомогою регулятора витрат **PP1**. Поворот маховика за годинниковою стрілкою супроводжується збільшенням витрати рідини. У кожному вимірюванні необхідно фіксувати температуру робочої рідини. Дані вимірювань занести в таблицю 1.

Крок 9. Після проведення вимірювань відключити живлення секундоміру, вимкнути електродвигун і живлення стенду.

Крок 10. Обчислити витрату рідини за 1 сек по формулі: $Q=V/t$ (л/сек).

Крок 11. Перевести витрату рідини Q з л/сек в $Q_{м\ куб}$ в м³/сек.

Крок 12. Визначити швидкість руху рідини в м/сек відношенням об'ємної витрати рідини $Q_{м\ куб}$ до площі перерізу потоку S : $w = Q_{м\ куб} / S$, де $S=\pi d^2/4$, d – внутрішній діаметр труби. $w = 4 Q_{м\ куб} / \pi d^2$ (м/сек).

Крок 13. Обчислити коефіцієнт кінематичної в'язкості ν за формулою $\nu = \mu/\rho$.

Крок 14. Обчислити число Рейнольдса: $Re = w\rho/\mu$. З урахуванням коефіцієнту кінематичної в'язкості $\nu = \mu/\rho$ число Рейнольдса обчислюється $Re = wd/\nu$.

Крок 15. Визначити динаміку зміни режиму напірної течії рідини у прямих гладких циліндричних трубах. Теоретично для руху води у прямих гладких циліндричних трубах напірних потоків встановлено наступні межі числа Рейнольдса: 1) $Re \leq 2320$ – стійкий ламінарний режим; 2) $Re \geq 10000$ – стійкий турбулентний режим; 3) $2320 \leq Re \leq 10000$ – перехідний режим, нестійкий ламінарний режим.

Таблиця 1

Експериментальні дані та розрахункові значення

№ п/п	Внутрішній діаметр труби $d=8$ мм Початкова температура $t_{ск} = 28$ °С						
	Температура t °С	Час t (сек)	Витрата V в л за час t	Витрата Q в л за 1 сек	Витрата Q в м ³ за 1 сек	Швидкість w (м/сек)	$Re = wd/\nu$
1	28	128	3062	0,016	1,56E-05	0,311	2 787,463
2	29	122	3064	0,016	1,64E-05	0,326	2 924,551
3	30	69	3066	0,029	2,90E-05	0,577	5 170,946
4	30	52	3068	0,038	3,85E-05	0,766	6 861,447
5	31	28	3070	0,071	7,14E-05	1,422	12 742,687
6	31	20	3072	0,100	1,00E-04	1,990	17 839,762
7	31	16	3074	0,125	1,25E-04	2,488	22 299,703
8	31	14	3076	0,143	1,43E-04	2,843	25 485,375
9	31	13	3078	0,154	1,54E-04	3,062	27 445,788
10	31	10	3080	0,200	2,00E-04	3,981	35 679,525
Довідкові величини, використані в розрахунках Динамічний коефіцієнт в'язкості води $\mu = 8,90 \cdot 10^{-4}$ Па·с при $t = 25$ °С Щільність води при $t=25$ °С $\rho = 997,1$ кг/м ³							

Розрахунки, візуалізація та аналіз отриманих результатів. Розроблена методика була використана під час проведення експерименту курсантами Дунайського інститут Національного університету «Одеська морська академія». В таблиці 1 показані отримані експериментальні дані, та значення фізичних величин, розраховані за допомогою табличного процесора MS Excel.

Розраховані значення виділені курсивним шрифтом. Експериментальна залежність числа Рейнольдса від швидкості течії рідини (рис. 5) графічно відображає динаміку зміни режиму течії рідини в судовому трубопроводі.

На рис. 5 позначено точку зміни режиму течії рідини зі стійкого *ламінарного* режиму на стійкий *турбулентний*. У загальному вигляді крива залежності найбільш наближена до лінійної. Однак на графіку чітко видно поділ кривої на три ділянки із зростаючим кутом нахилу до осі абсцис. Після значення швидкості $w > 3,06$ м/сек число Рейнольдса стрімко зростає. Турбулентні вихори рідини призводять до виникнення явища *гідродинамічної кавітації* – утворення всередині рідини кавітаційних бульбашок – порожнин, заповнених газом, парою або їх сумішшю. Під впливом різниці тиску в частинах рідини кавітаційні бульбашки руйнуються, і створюють ударну хвилю на стінки трубопроводу. Ці процеси призводять до кавітаційної корозії, яка викликає руйнування поверхонь труб, зношення та вібрацію трубопроводів та трубопровідної арматури, зменшення ККД та ефективності роботи насосів, турбін тощо. Для усунення негативного впливу кавітації потрібно уникати турбулентних потоків, та застосовувати стійкі до корозії матеріали.

Висновки. В роботі описані проблеми надійної експлуатації судових трубопроводів внаслідок агресивного впливу різновидів судового палива, та турбулентного режиму течії рідини, що призводять до руйнування поверхонь труб, зношення та вібрації трубопроводів та арматури. Обґрунтовано актуальність

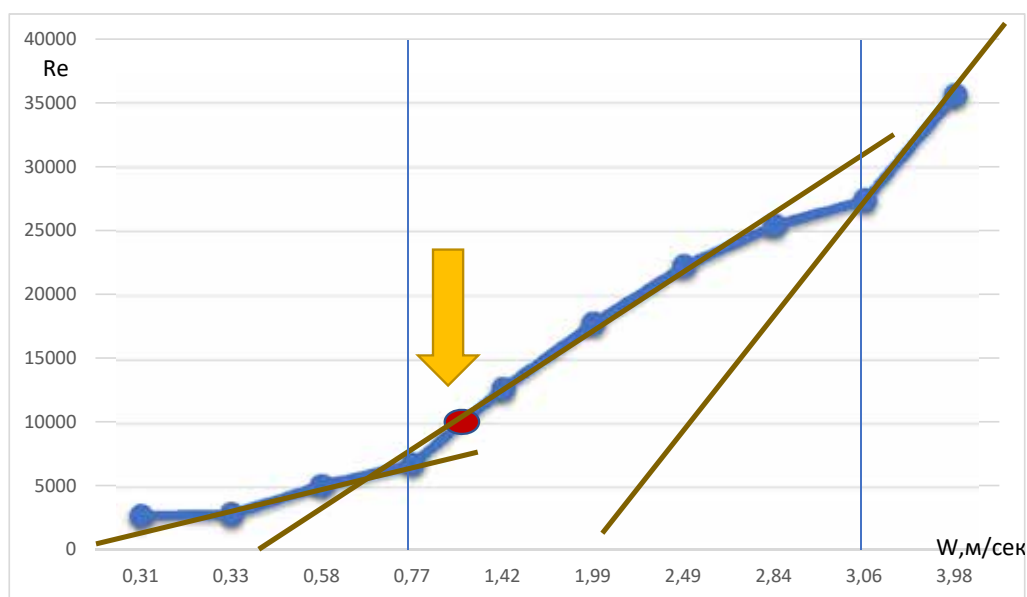


Рис. 5. Залежність числа Рейнольдса від швидкості течії рідини

досліджень фізичних процесів в області молекулярної фізики та механіки суцільних середовищ здобувачами вищої освіти у сфері морської інженерії.

Встановлена найпоширеніша проблема суднових трубопроводів – розгерметизація, яка відбувається за низки причин: руйнування внутрішніх поверхонь труб, зношення та вібрацію трубопроводів та трубопровідної арматури, понаднормове збільшення тиску, замерзання рідини в трубопроводі при низьких температурах, корозія труб та арматури внаслідок впливу агресивних середовищ при використанні різновидів судового палива, таких як метанол, водень, біодизель. Описані проблеми транспортування та зберігання цих видів палива, та їх негативний вплив на судові трубопроводи.

З використанням системно-структурного підходу розроблені багаторівневі класифікаційні структурна та функціональна схеми системи суднових трубопроводів.

Розроблена покрокова методика дослідження руху рідини. За цією методикою на лабораторному стенді НТЦ-11.38 «ГІДРАВЛІКА, ГІДРОМАШИНИ І ГІДРОПРИВОДИ» курсантами Дунайського інститут Національного університету «Одеська морська академія» проведено дослідження та отримані експериментальні дані. Розрахунки та візуалізація результатів виконані у табличному процесорі MS Excel.

Досліджено динаміку зміни швидкості течії рідини та числа Рейнольдса. Визначено точку зміни режиму течії рідини зі стійкого ламінарного режиму на стійкий турбулентний. Встановлено, що при значенні швидкості $w > 3,06$ м/сек число Рейнольдса стрімко зростає. Турбулентні вихори рідини призводять до виникнення явища гідродинамічної кавітації та кавітаційної корозії, яка викликає руйнування внутрішніх поверхонь труб, викликає зношення та вібрацію трубопроводів та трубопровідної арматури, зменшення ККД та ефективності роботи насосів, турбін тощо. Для усунення негативного впливу гідродинамічної кавітації потрібно уникати турбулентних потоків та застосовувати в трубопроводах стійкі до корозії матеріали.

В роботі застосований інтегрований підхід до вивчення освітнього компоненту «Фізика», який поєднує теоретичні знання та практичні навички в області фізики, методології дослідження, та інформаційних технологій. Наразі цей підхід є актуальним, і широко впроваджується в освітніх процесах багатьох країн світу.

Залучення курсантів до науково–дослідної роботи дало можливість розвинути наступні компетентності: розуміння мети роботи та визначення критеріїв її досягнення, пошук необхідної інформації та найбільш ефективного способу досягнення мети, практичні навички класифікації сутностей, навички роботи з лабораторним обладнанням, здатність застосовувати аналітичні та експериментальні методи для вирішення складних задач, та інформаційні технології для обробки даних, управління процесом виконання роботи, здатність аналізувати результати, формулювати та обґрунтовувати висновки.

Подальші дослідження будуть спрямовані на поглиблення інтегрованого підходу до вивчення освітнього компоненту «Фізика» шляхом моделювання фізичних процесів та застосування сучасних мов програмування для обробки експериментальних даних.

ЛІТЕРАТУРА

1. Курушин М., Непомнящий Н. Великая книга катастроф. Ч.1. Москва.: ОЛМА Медиа Групп, , 2007. 255 с
2. Вікіпедія. Катастрофа пароплава «Адмірал Нахімов». Вільна енциклопедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Катастрофа_пароплава_«Адмірал_Нахімов» (дата звернення 01.02.2023)
3. Овчинников И. Н. Судовые системы и трубопроводы (устройство, изготовление и монтаж). Л., «Судостроение», 1988. 296 стр.
4. Яремчук С.О., Павлова О. А. Аналіз особливостей водневих суднових паливних систем. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: матеріали XI Міжн. наук.-практ. конф. Ізмаїл, 3-4 грудня 2020 р. Запоріжжя : АА Тандем, 2020. С. 94–99.
5. Яремчук С.О., Д. В Воронцов. Альтернативне паливо на судні: аналіз особливостей метанолу. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: матеріали XI Міжн. наук.-практ. конф. Ізмаїл, 3–4 грудня 2020 р. Запоріжжя : АА Тандем, 2020. С. 75–79.
6. Дмитрієв П.Р. Аналіз техніко-експлуатаційних характеристик та впливу біопалива на суднову енергетичну установку. Матеріали XI Всеукраїнської студентської наукової конференції «Сучасні проблеми морського транспорту та безпека мореплавства», м. Херсон, 18 листопада 2021 року. – Херсон : Видавництво ХДМА, 2021. С. 180–183.
7. Михайленко В.І., Білоус В.М., Поповський Ю.М. Загальна фізика: Навчальний посібник. Друге видання, перероблене та доповнене – Одеса: ВидавІнформ ОНМА, 2012. 475 с.
8. Шерстнев Н.В. Обслуживание и ремонт судовых трубопроводов, арматуры и фильтров. Учебное пособие. – Москва: Инфра-М. 2021 ; 372 с.
9. Катренко А. В. Системний аналіз : підручник / за ред. В. В. Пасічника. Львів : Новий Світ-2000, 2011. 396 с.

REFERENCES

1. Kurushin, M., Nepomnyashij, N. (2007). The Great Book of Disasters [Velikaya kniga katastrof]. Part 1. Moskva: OLMA Media Grupp, p. 255. [in Russian].
2. Wikipedia. Free encyclopedia (2023). "Admiral Nakhimov" steamer disaster [Katastrofa paroplava «Admiral Nahimov»]. Retrieved from: https://uk.wikipedia.org/wiki/Katastrofa_paroplava_«Admiral_Nahimov» [in Ukrainian].
3. Ovchinnikov I. N. (1988) Ship systems and pipelines (device, preparation and installation) [Sudovye sistemy i truboprovody (ustrojstvo, izgotovlenie i montazh)]. L., «Sudostroenie», p. 296. [in Russian].
4. Yaremchuk, S.O., Pavlova, O.A. (2020). Analysis of the features of hydrogen marine fuel systems [Analiz osoblyvostej vodnevyyh sudnovyyh palivnyh system]. Materials of the XI International Scientific and

- Practical Conference "Modern approaches to high-efficiency use of transport means". Izmail, December 3-4. Zaporizhzhya: AA Tandem, P. 94–99. [in Ukrainian].
5. Yaremchuk, S.O., Voroncov, D.V. (2020). Alternative fuel on the ship: analysis of methanol features [Alternatyvne palyvo na sudni: analiz osoblyvostej metanolu]. Materials of the XI International Scientific and Practical Conference "Modern approaches to high-efficiency use of transport means". Izmail, December 3–4. Zaporizhzhya: AA Tandem, P. 75–79. [in Ukrainian].
 6. Dmitriyev, P.R. (2021) Analysis of technical and operational characteristics and effect of biofuels on the ship's power plant [Analiz tehniko-eksploataciynih harakterystik ta vplivu biopalyva na sudnovu energetychnu ustanovku]. Materials of the XI All-Ukrainian Student Scientific Conference "Modern Problems of Maritime Transport and Maritime Safety," Kherson, November 18. Kherson: Publishing House KHDMA, P. 180–183. [in Ukrainian].
 7. Mihajlenko, V.I., Bilous, V.M., Popovskij, Yu.M. (2012). General Physics: Tutorial [Zagalna fizyka: Navchalnyj posibnyk]. Second edition, revised and supplemented – Odesa: VydavInform ONMA, 475 p. [in Ukrainian].
 8. Sherstnev, N.V. (2021) Servicing and repair of ship pipelines, valves and filters. Educational support [Obsluzhivanie i remont sudovyh truboprovodov, armatury i filtrov. Uchebnoe posobie] – Moskva: Infra-M, 372 p. [in Russian].
 9. Katrenko, A. V. (2011). System analysis: textbook [Systemnyi analiz: pidruchnyk] / ed. by V. V. Pasichnyk. Lviv: Novyi Svit-2000, 396 p. [in Ukrainian]

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 629.7:629.072.1

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.10>

КІНЕМАТИЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ЯК ЗАСІБ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПОШУКУ СКУПЧЕНЬ РИБИ

І.С. Афтаназів¹, І.Г. Свідрак², О.О. Бойко³, О.І. Строган⁴

¹д.т.н., професор кафедри «Нарисної геометрії та інженерної графіки»,
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-3484-7966

²к.т.н., доцент кафедри «Нарисної геометрії та інженерної графіки»,
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-1811-2011

³к.т.н., доцент кафедри «Нарисної геометрії та інженерної графіки»,
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-0871-6375

⁴к.т.н., старший викладач, кафедри «Нарисної геометрії та інженерної графіки»,
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-1790-6736

Анотація

Вступ. У статті запропоновано шляхи вдосконалення пошуків скупчень риби у річковому та морському промисловому риболовстві. Це вдосконалення ґрунтується на оптимізації переміщень риболовецьких суден при здійсненні ними пошуку скупчень риби. Оптимізація пошукових переміщень риболовецьких суден поєднується із вдосконаленням визначення координат скупчень риби засобами кінематичного проектування. Специфіка кінематичного проектування тут проявляється в узгодженості швидкостей просторових переміщень усіх складових проектування. Для досягнення цього пропонуються розроблені математичні залежності, які надають можливість розраховувати координати переміщень у товщі морських глибин розшукуваних скупчень риби.

Відмінністю запропонованої методики пошуків скупчень риби є використання допоміжного пошукового судна, наприклад, моторного човна чи катера, що оснащено пошуковою гідроакустичною апаратурою. Допоміжне пошукове судно рухається паралельно або навколо риболовецького судна на віддалі від нього, яка обумовлена радіусом ефективної пошукової дії їх гідроакустичної апаратури.

Основною метою дослідження була розробка оптимальної траєкторії пошукових переміщень риболовецького та допоміжного суден для забезпечення максимальної ефективності пошуку скупчень риби при мінімальних витратах ними палива.

Висновки. Основними перевагами даної методики оптимізації пошукових переміщень суден є:

- зменшення негативного впливу на точність визначення координат скупчень риби хибних відбитих від дна водойми ехолокаційних сигналів. Це забезпечується використанням засобів кінематичного проектування;
- пониження сумарних витрат палива на пошукові переміщення суден в акваторіях пошукових ділянок. Це забезпечується оптимізацією траєкторій і узгодженістю переміщень риболовецького та допоміжного суден.

Ключові слова: пошук риби, морський промисел, ехолокація, кінематичне проектування, нарисна геометрія, координати, траєкторія переміщень, риболовне судно.

KINEMATIC DESIGN AS A MEANS OF IMPROVING THE SEARCH FOR FISH AGGREGATIONS

I.S. Aftanaziv¹, I. H. Svidrak², O.O Boiko³, O.I. Strohan⁴

¹Doctor of Technical Sciences, Professor
of the Department “Geometry and Engineering Graphics”
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-3484-7966

²PhD of Technical Sciences Professor
of the Department “Geometry and Engineering Graphics”
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-1811-2011

³PhD of Technical Sciences Professor
of the Department “Geometry and Engineering Graphics”
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-0871-6375

⁴PhD of Technical Sciences, Assistant
of the Department “Geometry and Engineering Graphics”
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-1790-6736

Summary

Introduction. The article proposes ways to improve the search for fish aggregations in river and sea industrial fishing. This improvement is based on the optimization of movements of fishing vessels when searching for fish aggregations. Optimizing the search movements of fishing vessels is combined with improving the determination of the coordinates of fish clusters by means of kinematic design. The specificity of kinematic design here is manifested in the consistency of the speeds of spatial movements of all design components. To achieve this, developed mathematical dependencies are proposed, which make it possible to calculate the coordinates of movements in the stratum of the sea depths of the wanted fish clusters.

The difference between the proposed method of searching for fish clusters is the use of an auxiliary search vessel, for example, a motor boat or a boat equipped with search hydroacoustic equipment. The auxiliary search vessel moves parallel to or around the fishing vessel at a distance from it, which is determined by the effective search radius of their hydroacoustic equipment.

Purpose. The main goal of the study was to develop the optimal trajectory of search movements of fishing and auxiliary vessels to ensure maximum efficiency in searching for fish aggregations with minimal fuel consumption.

Conclusions. *The main advantages of this method of optimization of search movements of vessels are:*

- *reducing the negative impact on the accuracy of determining the coordinates of fish clusters of false echolocation signals reflected from the bottom of the reservoir. This is ensured by the use of kinematic design tools;*
- *reduction of total fuel consumption for search movements of vessels in the water areas of search areas. This is ensured by the optimization of trajectories and coordination of movements of fishing and auxiliary vessels.*

Key words: *search for fish, sea fishing, echolocation, kinematic design, sketch geometry, coordinates, trajectory of movements, fishing vessel.*

Очевидним та незаперечним є той визнаний факт, що успіх промислового вилову риби, у першу чергу, регламентується вдалим пошуком місць її скупчень. В морському риболовецькому промислі такі скупчення риби часто називають «косяками». Звичайно немаловажну роль відіграють такі чинники як досконалість та надійність риболовецького спорядження, ефективність пошукової апаратури, метеорологічні умови, включно із станом водного плеса, тощо. Однак, що у минулому, що у сьогоднішньому чи в майбутньому найвідповідальнішим залишається спроможність із найменшими часовими та виробничими затратами розшукати промислові скупчення риби. Такі скупчення, які відповідатимуть не тільки різновиду риби, а і її кількісному наповненню.

Усвідомлення цього постає «наріжним каменем» як в процесах вдосконалення пошукової апаратури, так і у вдосконаленнях методик пошуків. І тут закономірно покладаються доволі великі надії та сподівання на ефективне залучення до пошукових робіт та обробки їх даних швидкодійних засобів розрахунків та обробки інформації.

Впродовж останнього століття риболовецькі судна зорієнтовані у пошуках риби на використання ехолокації. Класичний метод пошуку тут передбачає попереднє узгодження місць вилову риби, захід риболовного судна на акваторію ділянки вилову, здійснення пошуковою гідроакустичною апаратурою зондування товщі води у пошуках скупчень риби і, як завершальний етап, її вилов. У випадку відсутності риби на обстежуваній ділянці пошуку або при її недостатній кількості риболовне судно переходить на іншу ділянку пошуку і продовжує розшукувати скупчення риби [1]. Розміри охопленої пошуковою апаратурою ділянки водного плеса регламентуються спроможністю сприйняття і опрацювання апаратурою відбитих ехосигналів.

При цьому вимушений за відсутності риби на початковій ділянці пошуків перехід на іншу пошукову ділянку супроводжується витратою палива на роботу маршового двигуна та на забезпечення життєдіяльності обладнання і екіпажу судна. Усе це відчутно підвищує енергозатрати на пошукові переходи риболовецького судна, а відповідно і збільшує собівартість виловленої риби.

Із врахуванням недоліків класичних методів пошуків скупчень риби вдосконалення пошукових етапів було спрямовано у трьох, хоч і взаємозалежних та все ж рівноправних, напрямках. Перший із них було зорієнтовано на вдосконаленні пошукової апаратури та її технологічних можливостей. Другий напрям закономірно було

спрямовано на оптимізацію траєктрій переміщень риболовних суден в процесах пошуків скупчень риби. При цьому оптимізувались не лише переміщення безпосередньо риболовного судна, а і переміщення супроводжуючих ці судна додаткових пошукових засобів, наприклад, допоміжних моторних пошукових катерів, легких літальних апаратів, гелікоптерів тощо. Третій напрям було спрямовано на вдосконалення засобів обробки пошукової інформації з метою, наприклад, уточнення даних щодо масового вмісту риби у виявлених її скупченнях. Безсумнівно, що усі ці напрями певним чином пов'язані між собою та взаємодоповнюючі, володіють як своїми перевагами, так і притаманними їм недоліками у застосуванні. Наприклад, завдяки конструктивним вдосконаленням сучасні пошукові гідролокатори дозволяють розпізнавати підводні об'єкти на віддаленості від 3 км до 4 км, а зорієнтовані на пошук риби ехолоти – на віддалі від 2,0 км до 2,5 км. Сучасні гідролокатори надають можливість здійснювати почерговий секторний та круговий огляд підводного простору. Це відчутно вдосконалює пошуковий процес об'єктів промислу.

Водночас завдячуючи вдосконаленню характеристик пошукової апаратури, зменшенню її габаритів та маси, застосуванню сучасних матеріалів та конструктивних рішень, появилася реальна можливість оснащення пошуковою апаратурою не лише великотоннажних риболовецьких сейнерів, а і оснащення нею риболовних шхун та моторних катерів. Це сприяло відчутному розширенню площ акваторій пошуку скупчень риби і на морських промислах, і на прісноводних водоймах із значними глибинами та розмірами.

Великі радіуси ефективної пошукової дії сучасної гідроакустичної апаратури дозволяють у сьогоденні успішно застосовувати допоміжні пошукові судна, які здійснюють пошук скупчень риби самостійно на певній віддаленості від основного риболовного судна. Виявивши промислове скупчення риби допоміжне судно надає основному риболовному судну інформацію про координати цього скупчення. Опрацювавши цю інформацію і прийнявши рішення щодо доцільності вилову риби на новій розвіданій ділянці риболовне судно переходить на цю нову ділянку і здійснює вилов риби. А допоміжне пошукове судно здійснює пошук нової перспективної ділянки вилову риби.

Проте такі спарені дії риболовного та допоміжного суден не позбавлені певних недоліків. Адже допоміжні пошукові судна здійснюють пошукову ехолокацію хаотично. І ймовірність того, що успішними будуть саме кожен із чергових пошукових переходів доволі незначна. Пошуки допоміжним судном скупчень риби можуть бути вельми тривалими в часі. Тому і цю пошукову схему доцільно вдосконалювати.

Об'єктом дослідження є способи пошуку скупчень риби у морському риболовному промислі.

Предмет дослідження – методики визначення і розрахунків координат виявлених у товщі води об'єктів та визначення обсягів риби у виявлених скупченнях.

Метою дослідження була оптимізація траєкторій пошукових переміщень риболовного та допоміжного суден для забезпечення максимальної ефективності пошуків скупчень риби при мінімальних витратах палива на переходи суден та створення методики вдосконалення пошуків координат скупчень риби засобами кінематичного проектування.

Для досягнення означеної мети було окреслено такі основні завдання дослідження:

- створення методики розрахунку координат переміщень скупчень риби із застосуванням математичного апарату кінематичного проектування;
- розробка принципів схем переходів риболовного та допоміжного суден для збільшення площі ділянок ефективного пошуку скупчень риби;
- дослідження запропонованої схеми розрахунків кінематичним проектуванням обсягів риби у виявлених її скупченнях;
- створення алгоритму та блок-схеми програмного забезпечення розрахунків координат та обсягів скупчень риби засобами кінематичного проектування.

Наукова новизна результатів дослідження вбачається у розробці оновленої теоретично аргументованої методики визначення координат та обсягів скупчень риби при її промислового вилову із глибин моря та прісноводних водойм, яка ґрунтується на використанні основ кінематичного проектування.

Практична значимість результатів дослідження очікується у наступних певних перевагах їх застосування та використання. Першочергово, описані методи та методики визначення координат скупчень риби, а також запропоновані математичні залежності їх розрахунків нададуть можливість більш, ніж вдвічі збільшити площу акваторії пошуку скупчень риби. Зрозуміло, що це пропорційно понизить трудозатрати на провадження пошукових робіт, а відповідно і витрати палива на здійснення здійснення риболовним судном переходів між пошуковими ділянками. Одночасно засоби кінематичного проектування дозволять оперативно і об'єктивно оцінити геометричні розміри виявленого скупчення риби та прорахувати її вміст у цьому скупченні. Очікувано, що це полегшить команді риболовного судна прийняти зважені рішення стосовно доцільності вилову риби саме із даного її скупчення.

Матеріали та методи дослідження. Прикладом успішного використання кінематичного проектування для визначення координат та траєкторій просторових переміщень рухомих об'єктів можна вважати успішні дослідження українських геометрів в галузі визначення координат безпілотних літальних апаратів (БПЛА) [2, 3]. Цими дослідженнями створена теоретична база математичного апарату для розрахунку засобами кінематичного проектування траєкторій та координат просторових переміщень ворожих ударних та диверсійно-розвідувальних БПЛА. Високу ефективність та точність визначення траєкторій та просторових координат рухомих об'єктів методами кінематичного проектування підтверджено експериментально.

Усвідомлення актуальності та доцільності залучення сучасного математичного апарату та останніх досягнень нарисної геометрії до пошуків скупчень риби у морських просторах було основою даного дослідження.

Методи та методики математичного і фізичного моделювання швидкоплинних процесів та математичної статистики класифікації і аналізу їх результатів застосовувалися у процесі проведення теоретико-експериментальних досліджень. Положення теорії відображення траєкторій та координат просторових переміщень рухомих об'єктів засобами нарисної геометрії при поєднанні класичного ортогонального проектування із динамічними особливостями кінематичного

проектування були основою експериментального дослідження. Теорія планування досліджень із математичним апаратом опрацювання їх результатів застосовувалась для об'єктивної оцінки результатів теоретико-експериментального дослідження динаміки рухомих у просторі об'єктів. Із застосуванням обчислювальної техніки та програмного продукту графічного редактора AutoCAD відображено графічні моделі фіксації координат скупчень риби.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Практично кожний із вище окреслених напрямів покращення ефективності методів пошуку скупчень риби вдосконалюється та розвивається як незалежно один від іншого, так і у їх спільному взаємозв'язку. Так досягнення в такій галузі науки і техніки як телеметрія дозволили завдяки контролю заповнення рибою кошелєвих тралів підвищити не лише ефективність пошуку, а і відчутно збільшити обсяги вилову риби [4, 5]. Не менш ефективним виявилось і вдосконалення конструкцій пошукових випромінюючих антен [6, 7], яке сприяло нарощуванню обсягів вилову даної риби. Опираючись у своїх пошуках ще на методики минулого століття, які полягали у оптимізації пошукових галсів риболовецьких суден [1], продовжуються невинні пошуки оптимальних траєкторій переміщень спарених дуетів риболовного та допоміжного пошукових суден [8, 9].

Певною мірою невинні вдосконалення пошукових процесів у промисловому вилові риби обумовило і відчутне зменшення її кількості та різновидів у морських глибинах. Різкі зміни погодних умов, що обумовлені «парниковими ефектами» в атмосфері Землі, зумовлені цим зміни течій та нерестових умов, а частково і вдосконалені засоби пошуку та безпосередньо вилову риби, неминуче мали спровокувати стрімке зменшення кількості риби у морях. Відповідно пропорційно наростають трудозатрати на її пошуки та виловлювання. Саме тому не втрачають своєї актуальності наукові дослідження в галузях як вдосконалення наявних, так і в створенні новітніх досконаліших методик пошуків скупчень промислової риби. Методик та методів, які не лише ґрунтуються на можливостях сучасної пошукової апаратури, а також і на використанні досягнень математики те невичерпних можливостей обчислювальної техніки.

Неаби-які перспективи в цьому руслі спостерігаються в намірах залучити до методик пошуків координат, швидкостей та траєкторій просторових переміщень рухомих об'єктів, загалом, і окремих скупчень риби, у тому числі, можливостей нарисної геометрії. А переважно такої її складової, яка відома як кінематичне проектування [10, 11]. Тут під терміном «кінематичне проектування (відображення)» слід розуміти проектування, усі складові якого, а саме фокальні фігури проєктуючих комплексів та конгруенцій, центри і об'єкти проектування (прообрази), а також носії проєкцій («картинна площина») можуть здійснювати взаємозалежні переміщення у просторі та часі.

Свій певний внесок у становлення та розвиток і застосування кінематичного проектування як науки про рухомі динамічні об'єкти було здійснено і науковцями України, зокрема провідними вченими НУ «Львівська політехніка» [10, 11]. Ще у кінці минулого століття ними вперше було запропоновано застосування розроблених лінійних операторів для спінографічних, ротографічних та грамографічних відображень рухомих у просторі об'єктів. Водночас із

розробкою алгоритмів рішення так званої прямої задачі кінематичного проектування, яка полягає у пошуку проекцій траєкторій просторових переміщень об'єктів, цими дослідженнями [10] було розроблено і алгоритми рішень так званої «оберненої задачі». Ця «обернена задача» надає спроможність пошуків за відомою траєкторією руху координати просторового розміщення рухомого об'єкта. Продовжені у 20-х роках нашого століття дослідження НУ «ЛП» теорії кінематичного проектування, а також воєнні події на території України спонукали спрямувати ці дослідження в русло покращення обороноздатності держави. Так зокрема у роботі [2] було розглянуто спроможність застосування кінематичного проектування для визначення координат та траєкторій просторових переміщень ворожих ударних та диверсійно-розвідувальних безпілотних літальних апаратів.

У продовження цих досліджень в роботі [12] авторами проаналізовано спроможність застосування методології кінематичного проектування для пошуків та знешкодження плаваючих мін. Тут вперше продемонстрована послідовність визначення координат мін за даними розвідки поверхні моря чи прісноводної водойми безпілотними літальними апаратами, запропонований алгоритм розрахунків координат виявлених мін у запровадженій на катері-тралівнику системі координат.

До можливостей пошуків рухомих об'єктів у морських глибинах теорія кінематичного проектування ще не досліджувалась. То ж певною мірою дану наукову роботу можна вважати «піонерською». Сподіваємося, що окрім свого внеску у теорію кінематичного проектування дане дослідження матиме і практичне застосування у риболовному промислі.

Основні результати дослідження. Специфічні особливості застосування засобів кінематичного проектування для підвищення ефективності пошуків скупчень риби у морських глибинах та принципову пошукову схему, що відображає суть застосування засобів кінематичного проектування, відображено на рис. 1–4.

На рис. 1 та рис. 2 схематично відображено пошук скупчень риби із застосуванням методик та засобів кінематичного проектування. Для реалізації цієї схеми пошуку використовують два незалежні плаваючі засоби, наприклад, безпосередньо риболовне судно та допоміжний плаваючий катер. Кожен із цих плаваючих засобів оснащений пошуковою гідролокаційною апаратурою та мережею надійного взаємозв'язку. Окрім традиційного спорядження для пошуку скупчень риби риболовне судно повинно бути оснащено сучасною швидкодіючою обчислювальною технікою та належним їй програмним забезпеченням для опрацювання результатів пошуку риби.

У якості пошукового допоміжного плаваючого засобу тут може використовуватися, наприклад, потужний катер чи моторизований човен, що спроможний протистояти вітровому навантаженню та обумовленому ним хвильовому збуренню морської поверхні. Сприйнятим є і варіант, у якому в якості допоміжного використовуватимуть ще одне риболовне судно. Тому організуючи розвідувальні роботи із пошуків скупчень риби у певних акваторіях моря доречно таким чином організувати їх, щоб максимально широко охопити площі пошукових ділянок.

Поряд із потужністю пошукової апаратури, тут важливе значення мають і траєкторії пошукових переміщень використовуваних для пошуків технічних засобів. При цьому часто збільшують кількість одночасно використовуваних пошукових пристроїв та засобів, узгоджуючи поміж ними траєкторій їх просторових переміщень та режими пошукової роботи [6, 7, 10].

Пошук промислово придатних скупчень риби із використанням допоміжного плаваючого судна та із застосуванням кінематичного проектування (рис. 1) здійснюють у наступній послідовності.

Риболовне судно 1 із встановленими на ньому пошуковою апаратурою та засобами радіозв'язку і обчислювальною апаратурою заходить в центральну частину виділеної йому для пошуків риби ділянки 3 акваторії моря. Тут відшвартовують оснащений пошуковою апаратурою допоміжний плаваючий засіб 2, наприклад, моторний човен, який відходить від риболовного судна на віддаль

$$m = R + r,$$

де R – радіус півсфери ефективної пошукової дії гідроакустичної апаратури риболовного судна;

r – радіус півсфери ефективного пошуку гідроакустичної апаратури допоміжного пошукового судна.

Вилаштуванням у одну лінію риболовному 1 та допоміжному 2 плаваючому суднам в процесі пошуку риби надають переміщення по спіралі Архімеда 3 та 4, крок якої рівний

$$n = D + d, n$$

де D та d – відповідно діаметри півсфер ефективного пошуку гідролокаційної апаратури риболовного та допоміжного суден (рис. 1).

Центр спіралі Архімеда, по якій переміщаються пошукові судна, умовно облаштовано в центрі пошукової ділянки акваторії моря.

Траєкторію руху обох пошукових суден по спіралі Архімеда обрано із наступних міркувань:

- дана траєкторія не допускає наявності необстежених ділянок акваторії моря;
- ця плавна траєкторія, на відміну від інших можливих, не передбачає зворотних рухів та стрімких поворотів, що не є бажаним для процесу пошуку скупчень риби.

Якщо прийняти за середню допустиму швидкість пошукових переміщень риболовного та допоміжного плаваючого суден швидкість від 9,5 вузлів до 11 вузлів, тобто 18–20 км/год., то за годину часу роботи цими пошуковими суднами за умови просторових їх переміщень по спіралі Архімеда буде обстежено понад шість квадратних кілометрів акваторії моря.

Площа, що прозондовується пошуковою апаратурою кожного із пошукових суден, пропорційна пройденому ними шляху, тобто довжині їх переміщень по поверхні водойми, що відображається кількістю пройдених ними витків по спіралі Архімеда, та ширині смуги зондування. Для риболовного судна ця площа рівна

$$S_t = \sum \ell_{i(t)} \cdot D,$$

де $\sum \ell_{i(t)}$ – сумарна довжина пройдених риболовним судном витків спіралі Архімеда.

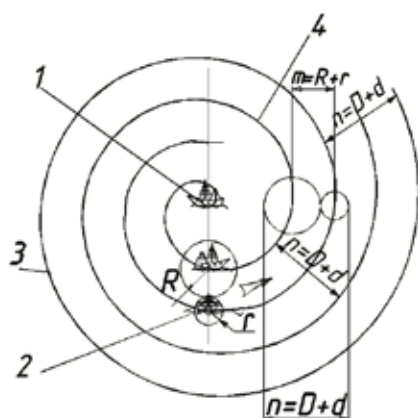


Рис. 1. Траекторія просторових переміщень по спіралі Архімеда риболовного та допоміжного плавучого суден в пошуках скупчень риби

Для допоміжного пошукового катера ця площа рівна

$$S_k = \sum \ell_{i(k)} \cdot d,$$

де $\sum \ell_{i(k)}$ – сумарна довжина пройдених допоміжним пошуковим катером витків спіралі Архімеда.

Оскільки сумарна довжина пройдених пошуковими суднами витків спіралі практично однакова, то співвідношення ε обстежених ними площ водойми відображається співвідношенням діаметрів півсфер ефективної пошукової дії гідроакустичної апаратури цих суден, тобто

$$\varepsilon = \frac{S_t}{S_k} = \frac{\sum l_{i(t)} \cdot D}{\sum l_{i(k)} \cdot d} = \frac{D}{d} = \frac{R}{r}$$

Оскільки радіус r півсфери ефективної пошукової дії гідроакустичної апаратури допоміжного пошукового катера призначають в діапазоні $0,5R \leq r \leq R$, то можна стверджувати, що використання допоміжного пошукового катера дозволяє у 1,5–2 рази збільшити площу обстеженої в одиницю часу площі водної поверхні.

Масивне риболовне судно при його пошукових переміщеннях по обстежуваній водній поверхні витрачає на порядок більше палива порівняно із легким малогабаритним пошуковим катером. Відповідно при зменшенні у 1,5–2 рази пройденого ним шляху пропорційно зменшиться і кількість витраченого на це палива.

Наприклад, при швидкості руху риболовного судна $v_{(t)} = 5,5$ вузлів впродовж однієї години ним буде пройдено біля 10 км та обстежена смуга водного плеса довжиною $\ell_t = 10$ км і шириною $D = 0,4$ км, тобто площею

$$S_t = \ell_t \cdot D = 10 \cdot 0,4 = 4 \text{ км}^2$$

На це буде витрачено приблизно 100 літрів палива із розрахунку витрати палива цим судном 10 літрів на 1 км пройденого шляху. Якщо цю ж площу $\Sigma S = 4 \text{ км}^2$ одночасно обстежують обидва пошукові судна і ширина пошукової смуги допоміжного катера вдвічі менша від ширини пошукової смуги риболовного судна, то обом пошуковим суднам доведеться пройти по 6,5 кілометри. Тоді риболовним

судном буде використано 65 літрів палива, а допоміжним пошуковим катером, із розрахунку, що він витрачає 2,5 літра палива на 1 км пройденого шляху, приблизно 16 літрів палива. Сумарно це складе 81 літру витраченого обома пошуковими суднами палива. Це майже на 20% менше, порівняно із витратами палива на пошукові переміщення виключно лише риболовного судна. До речі, цей відсоток економії палива зростає до 37,5%, якщо радіуси ефективної пошукової дії гідроакустичної апаратури пошукових суден будуть однакові.

У випадку виявлення будь-яким із пошукових суден скупчення риби обхід ними території по спіралі Архімеда призупиняють. По відповідній команді із командного пункту риболовне та допоміжне судна розташовуються рівновіддалено по два боки від виявленого скупчення риби. Після цього вмикають одночасно на обох суднах спостережну апаратуру для ідентифікації виявленого у морі скупчення. Саме спостереження та оброзмірювання виявленого скупчення риби з двох зміщених на 180° одна від одної точок (суден) надають можливість побудови на екрані монітора комп'ютера командного пункту твердотільної моделі даного виявленого рухомого об'єкта.

Якщо виявлене скупчення риби виявиться за своїм вмістом і обсягами доцільним для обловлювання, приступають до визначення координат та швидкості переміщень даного скупчення риби. Для цього, перш за все, використовуючи відповідну програму, уточнюють координати розташування даного скупчення. Спеціальною обчислювальною програмою вмикають алгоритм послідовності уточнення координат скупчення риби засобами кінематичного проектування.

При пошуках скупчень риби із використанням кінематичного проектування розрахунковою програмою передбачено виконання наступних етапів. На першому етапі у точці A , що символізує закінчення гідроакустичної пошукової випромінюючої антени 3 риболовного судна 1, умовно облаштовують тривимірну ортогональну систему координат (рис. 2). Вісь x цієї системи координат має початок у точці A і спрямована в напрямку точки B , що символізує місце та координати облаштування другої гідроакустичної випромінюючої антени 4 допоміжного судна 2. Вісь « z » бере початок в точці A , перпендикулярна осі x і спрямована вниз у морські глибини. Вісь « y » теж започатковується в точці A і перпендикулярна осям « x » та « z ». Спрямовані по поверхні водойми осі « x » та « y », як дві взаємно перпендикулярні прямі, утворюють так звану «базову» площину α . На віддалі a від точок A та B у площині $\alpha(x;y)$ задають допоміжну точку із координатами $C(a/2;0,87a;0)$. Задавши глибину H , що перевищує в $1,2-1,5$ рази орієнтовну глибину розташування скупчення риби, на перпендикулярах до базової площини α в точках A , B та C в напрямку морських глибин встановлюють точки M , N та P . Ці три точки M , N та P задають у морських глибинах чи просторі дна «картинну» площину $\beta(N;M;P)$, яка паралельна базовій площині $\alpha(A;B;C)$ і віддалена від неї на віддаль H , тобто $H=AM=CN=BP$; $\alpha(ABC)//\beta(MNP)$ (рис. 2). Розташування «картинної» площини β є уявним і необхідним лише для розрахунків координат. Тому ця «картинна» площина може бути заданою як у товщі води, так і навіть в глибинах морського дна чи дна обловлюваної прісноводної водойми. Це усуває небезпеку впливу на точність розрахунків координат при кінематичному проектуванні відбитих від дна водойми хибних сигналів ехолокаторів. І це

виявленого скупчення риби (точка K на рис. 2). Перетинні між собою проєктуючі промені p_1 та p_2 , разом формують площину $\gamma(p_1; p_2)$, яка перетинає базову α та картинну β площини по двох паралельних між собою лініях a та b .

На наступному третьому етапі комп'ютерна програма прораховує координати точок $F = p_2 \cap \beta$ та $T = p_1 \cap \beta$ перетину проєктуючих променів p_1 і p_2 із картинною площиною β . При цьому також визначають віддаль b між точками перетину проєктуючих променів із картинною площиною β , тобто $b = |FT|$.

Точки перетину проєктуючих променів із картинною площиною β шукають аналітичним методом. При аналітичному методі пошуку точки перетину задають аналітичне рівняння проєктуючого променя як рівняння прямої лінії, що проходить через відому точку (A або B) із заданими координатами під відомим кутом нахилу до базової площини α . Також задають аналітичне рівняння картинної площини β , що проходить через три точки M , N та P із відомими координатами. Точкою перетину прямої із площиною у цьому випадку буде шукана точка, координати якої одночасно задовольняють і рівняння прямої, і рівняння площини.

На четвертому етапі, володіючи координатами точок A та B , а також точок $F = p_2 \cap \beta$ та $T = p_1 \cap \beta$ перетину проєктуючих променів p_1 і p_2 із картинною площиною β , тобто координатами точок на кінцях відрізка проєктуючого променя, записують рівняння прямої лінії, що проходить через дві точки із відомими координатами. Тобто $A(x_A, y_A, z_A) \in p_1$; $T(x_T, y_T, z_T) \in p_1$; $p_1 \subset l_1$.

Тоді рівняння проєктуючого променя p_1 , як рівняння прямої, матиме вигляд

$$\frac{x - x_A}{x_T - x_A} = \frac{y - y_A}{y_T - y_A} = \frac{z - z_A}{z_T - z_A}. \quad (1)$$

Аналогічно для проєктуючого променя p_2 , що проведений через допоміжне пошукове судно (точка B) і точку F з відомими координатами $F(x_F, y_F, z_F)$, рівняння прямої l_2 , матиме вигляд

$$\frac{x - x_B}{x_F - x_B} = \frac{y - y_B}{y_F - y_B} = \frac{z - z_B}{z_F - z_B}. \quad (2)$$

Із двох рівнянь проєктуючих променів p_1 і p_2 формують систему рівнянь і спільним їх рішенням шукають координати точки $K(x_K; y_K; z_K)$ їх перетину як точки, у якій на даний час розташоване скупчення риби. Володіючи координатами розташування знайденого скупчення риби з математичної залежності, що визначає довжину відрізка прямої за координатами двох його кінцевих точок, розраховують віддаленість цього скупчення риби від риболовного судна

Для перевірки правильності здійснених розрахунків із двох подібних трикутників ΔABK та ΔFTK , утворених пересічними променями, вираховують координати їх спільної вершини точки K . Це точка $K(x_K; y_K; z_K)$, у якій на даний момент часу розміщене розшукуване скупчення риби (рис. 2). Із розв'язків вказаних трикутників визначають два вагомні для успішного пошуку скупчення риби параметри, а саме глибину h занурення цього скупчення та його віддаленість k від риболовного судна. Для цього використовують математичні залежності

$$k = h\sqrt{1 + (\text{Ctg}\alpha_x)^2}; \quad h = H\left(1 - \frac{b}{a + b}\right), \quad (3)$$

де k – віддаль від риболовного судна до виявленого скупчення риби;

h – глибина розташування скупчення риби відносно поверхні водного плеса водойми чи моря;

H – задана віддаль від поверхні моря до картинної площини;

a – віддаль між риболовним та допоміжним суднами;

b – віддаль між точками перетину проектуючих променів гідроакустичних пристроїв із картинною площиною;

α_x – кут нахилу проектуючого променя гідроакустичного пристрою до лінії a .

Якщо виявлені координати точки перетину між собою обох проектуючих променів співпадають у вище відзначених кроках перевірок, то роблять висновок про відповідність розрахованих координат розміщення скупчення риби їх реальному значенню.

На рис. 3 відображена схема застосування кінематичного проектування для наближеної оцінки кількості риби у виявлених її скупченнях. Виявивши скупчення риби 1 зосереджують проектуючі промені 2 та 3 кінематичного проектування почергово на точках S і V (велика вісь еліпсоїда) та точках W і J (мала вісь еліпсоїда) і визначають чисельні координати цих точок. За координатами характерних точок еліпсоїда 4 розраховують його велику та малу осі і визначають об'єм уявного еліпсоїда обертання, який немов би охоплює своєю поверхнею виявлене скупчення риби. Приймаючи притаманну для даного різновиду риби її густину у скупченні та володіючи розрахованим значенням об'єму охоплюючого скупчення риби еліпсоїда обертання, наближено вираховують кількість риби у скупченні.

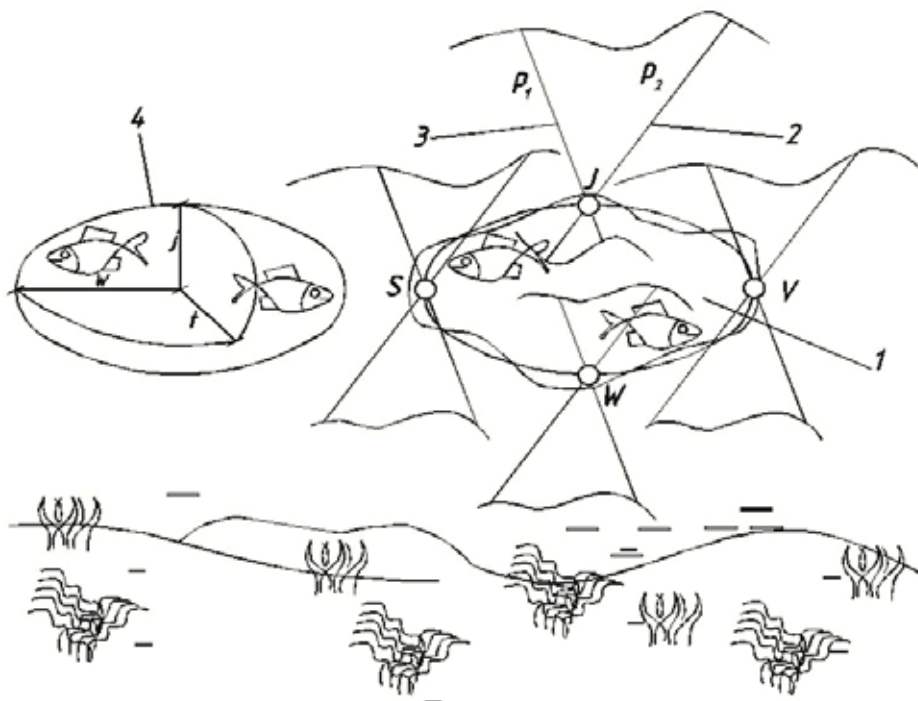


Рис. 3. Схема наближеного визначення кількості риби у її скупченні засобами кінематичного проектування

Для полегшення розрахунків у таблицях 1 та 2 приведено основні математичні залежності, що можуть застосовуватися для розрахунків координат виявлених скупчень риби.

Аналітичні рівняння проектуючих променів p_1 та p_2 і математичні залежності для визначення основних параметрів приведено у таблиці 2.

Послідовність розрахунків координат виявленого скупчення риби засобами кінематичного проектування проілюстровано на нижче приведені прикладі.

Задають координати точок, що формують базову $\alpha(A;B;C)$ поверхню, яка співпадає із морською поверхнею, та «картинну» $\beta(K,N,P)$ площину у товщі морських глибин чи дна водойми. Також задають віддаль між цими площинами, наприклад, $H = |\alpha\beta| = 500$ м. Нехай ключові точки, що задають базову та картинну площини, мають наступні координати:

– точка А, що розташована на кінці випромінюючої гідролокаційної антени риболовного судна 1 – $A(0,0,0)$;

– точка В, що розташована на кінці випромінюючої гідролокаційної антени допоміжного пошукового судна 2 – $B(a,0,0) = B(150,0,0)$;

– точка С на морській поверхні – $C(a/2;0,87a;0) = C(75;130,5;0)$;

– точка М, що розташована на перпендикулярі через точку А до поверхні моря (базова площина $\alpha(A; B; C)$) у товщі морського дна у картинній площині $\beta(M,N,P)$, причому $AM=H=500$ м – $M(0,0,500)$;

– точка Р, що розташована на перпендикулярі через точку В до поверхні моря (базова площина $\alpha(A;B;C)$) у товщі морського дна у картинній площині $\beta(M,N,P)$, причому $BP=H=500$ м – $N(150,0,500)$;

Таблиця 1

з/п	Опис формуючих кути ліній та площин	Позначення кутів для проектуючих променів:			
		Проектуючий промінь p_1		Проектуючий промінь p_2	
		Позначення	Значення у розглянутому прикладі	Позначення	Значення у розглянутому прикладі
1	Кут між проектуючим променем і віссю x	α_x	80°	γ_x	75°
2	Кут між проектуючим променем і його проекцією на горизонтальну площину поверхні водойми (базовою площиною)	α_{xy}	80°	γ_{xy}	75°
3	Кут між проекцією проектуючого променя на базову площину та віссю x	β	0°	g	0°
4	Кут нахилу площини проектуючих променів $\omega(p_1 \cap p_2)$ до базової площини $\alpha(x; y)$	ν	90°	ν	90°

Таблиця 2

№ з/п	Назва параметру	Проектуючі промені:	
		Проектуючий промінь p_1	Проектуючий промінь p_2
Рівняння проектуючих променів			
1	Напрямний вектор	$\begin{cases} x_0 = \cos \alpha_x \\ y_0 = \sqrt{\cos^2 \alpha_{xy} - \cos^2 \alpha_x} \\ z_0 = \sin \alpha_{xy} \end{cases}$	$\begin{cases} x_0 = \cos \gamma_x \\ y_0 = \sqrt{\cos^2 \gamma_{xy} - \cos^2 \gamma_x} \\ z_0 = \sin \gamma_{xy} \end{cases}$
2	Параметричні рівняння проектуючих променів	$\begin{cases} x_0 = t \cdot \cos \alpha_x \\ y_0 = t \cdot \sqrt{\cos^2 \alpha_{xy} - \cos^2 \alpha_x} \\ z_0 = t \cdot \sin \alpha_{xy} \end{cases} \quad t \geq 0 \quad (1)$	$\begin{cases} x_0 = k \cdot \cos \gamma_x \\ y_0 = k \cdot \sqrt{\cos^2 \gamma_{xy} - \cos^2 \gamma_x} \\ z_0 = k \cdot \sin \gamma_{xy} \end{cases} \quad k \geq 0 \quad (2)$
	Канонічні рівняння проектуючих променів	$\frac{x - x_T}{\cos \alpha_x} = \frac{y - y_T}{\sqrt{\cos^2 \alpha_{xy} - \cos^2 \alpha_x}} = \frac{z - z_T}{\sin \alpha_{xy}} \quad (1)$	$\frac{x - x_F}{\cos \gamma_x} = \frac{y - y_F}{\sqrt{\cos^2 \gamma_{xy} - \cos^2 \gamma_x}} = \frac{z - z_F}{\sin \gamma_{xy}} \quad (2)$
Параметри проектуючих променів			
3	Довжина	$AT = t = \frac{H}{\sin \alpha_{xy}}$	$BF = k = \frac{H}{\sin \gamma_{xy}}$
4	Координати точок перетину із картинною площиною β	$\begin{aligned} T(x_T; y_T; z_T) \\ x_T = \frac{H \cos \alpha_x}{\sin \alpha_{xy}} \\ y_T = \frac{H \cdot \sqrt{\cos^2 \alpha_{xy} - \cos^2 \alpha_x}}{\sin \alpha_{xy}}; \\ z_T = H \end{aligned}$	$\begin{aligned} F(x_F; y_F; z_F) \\ x_F = a - \frac{H \cos \gamma_x}{\sin \gamma_{xy}} \\ y_F = \frac{H \cdot \sqrt{\cos^2 \gamma_{xy} - \cos^2 \gamma_x}}{\sin \gamma_{xy}}; \\ z_F = H \end{aligned}$
5	Віддаль між точками перетину $b = TF $	$b = TF = \sqrt{(x_T - x_F)^2 + (y_T - y_F)^2 + (z_T - z_F)^2}$	
6	Глибина занурення скупчення риби	$h = H \left(1 - \frac{b}{a + b} \right)$	
7	Віддаль від риболовного судна до скупчення риби	$k = h \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha_x}$	
8	Координати скупчення риби у запровадженій системі координат	$K(x_K; y_K; z_K) \leftarrow \{ \text{із системи рівнянь проектуючих променів (мат. залежності (1) та (2))} \}$	

– точка N , що розташована на перпендикулярі через точку C до поверхні моря (базова площина $\alpha(A; B; C)$) у товщі морського дна у картинній площині $\beta(M, N, P)$, причому $CN = H = 500 \text{ м} - N(75; 130, 5; 500)$.

Нехай для спрощення демонстрації прикладу та полегшення розуміння суті кінематичного проектування вважатимемо, що риболовне та допоміжне пошукові

судна розташовані строго над виявленим скупченням риби, тобто судна і скупчення риби знаходяться у одній площині, що перпендикулярна до поверхні моря. У подальшому спрямовують у напрямку виявленого скупчення риби уявні проєктуючі промені, які беруть свій початок на кінцях пошукових гідролокаційних антен риболовного судна 1 ($p_1 = l_1$) та допоміжного пошукового судна 2 ($p_2 = l_2$) і проходять через виявлене скупчення риби до перетину із картинною площиною $\beta(M, N, P)$. Фіксують кути нахилу цих проєктуючих променів до лінії АВ, що з'єднує пошукові судна та співпадає із віссю x , тобто $\alpha_x^\circ = p_1^\wedge x$ та $\gamma_x^\circ = p_2^\wedge x$. Нехай кут $\alpha_x^\circ = 80^\circ$, а кут $\gamma_x^\circ = 75^\circ$. Тоді кут нахилу проєктуючого променя p_1 до осі z становитиме $\rho = 90^\circ - \alpha_x^\circ = 90^\circ - 80^\circ = 10^\circ$, а проєктуючого променя p_2 до вертикальної лінії ВР $\xi = 90^\circ - \gamma_x^\circ = 90^\circ - 75^\circ = 15^\circ$.

Визначають координати точок перетину проєктуючих променів p_1 та p_2 із картинною площиною $\beta(M, N, P)$. Це можна зробити або із графічних побудов, розв'язуючи прямокутні трикутники ΔAMT та ΔBPF , або аналітичним методом.

Із трикутника ΔAMT координата x_T точки перетину проєктуючого променя $p_1 = AT$ із картинною площиною $\beta(M, N, P)$

$$x_T = MT = AM \cdot \operatorname{tg} \rho = H \cdot \operatorname{tg} \rho = 500 \cdot \operatorname{tg} 10^\circ = 88,15 \text{ м}$$

Повні координати цієї точки T у прийнятій системі координат

$$T(x_T, y_T, z_T) = T(88,15; 0; 500),$$

а довжина проєктуючого променя $p_1 = AT$

$$p_1 = AT = 507,7 \text{ м}$$

Із трикутника ΔBPF довжина катета PF

$$PF = BP \cdot \operatorname{tg} \xi = H \cdot \operatorname{tg} \xi = 500 \cdot \operatorname{tg} 15^\circ = 134 \text{ м.}$$

Тоді координата x_F точки перетину проєктуючого променя $p_2 = BF$ із картинною площиною $\beta(M, N, P)$

$$x_F = MT = AB - PF = a - PF = 150 - 134 = 16 \text{ м}$$

Повні координати цієї точки F в прийнятій системі координат

$$F(x_F, y_F, z_F) = F(16; 0; 500),$$

а довжина проєктуючого променя $p_2 = BF$

$$p_2 = BF = 517,6 \text{ м}$$

Віддаль між точками F та T перетину проєктуючими променями p_1 та p_2 картинної площини $\beta(M, N, P)$

$$b = x_T - x_F = 88,15 \text{ м} - 16 = 72,15 \text{ м}$$

Із математичних залежностей (3) визначають два вагомні для успішного пошуку скупчення риби параметри, а саме глибину розміщення скупчення h та віддаленість k цього скупчення риби від риболовного судна 1.

Глибину h розташування даної донного скупчення риби визначають із виразу

$$h = H \left(1 - \frac{b}{a+b} \right) = 500 \left(1 - \frac{72,15}{150 + 72,15} \right) = 337,5 \text{ м,}$$

а віддаль k від риболовного судна 1 до виявленого скупчення риби 3 розраховують із математичної залежності

$$k = \frac{h}{\sin \alpha_x} = \frac{337,5}{\sin 80^\circ} = 342,6 \text{ м}$$

У запровадженій ортогональній системі координат із її початком в точці А на кінці випромінюючої антени риболовного судна 1 координата скупчення риби 3 по осі x становитиме

$$x_K = h \cdot \operatorname{ctg} \alpha_x^\circ = 337,5 \cdot \operatorname{ctg} 80^\circ = 59,4 \text{ м}$$

а загальні координати скупчення риби (точка К) у цій системі координат

$$K(x_K, y_K, z_K) = K(59,4; 0; 337,5)$$

На рис. 4 відображена блок-схема послідовності розрахунків та побудови комп'ютерної програми для визначення координат виявленого пошуковими суднами скупчення риби. Розрахункова блок-схема передбачає введення табличних вхідних даних, до яких належать модель та кількість пошукових суден, характеристика їх просторового розташування та переміщень, ширина пошукової смуги під час пошуків скупчень риби тощо.

Безпосередньо розрахунок передбачає декілька етапів. Зокрема, визначення віддалі від базового риболовного судна до допоміжного пошукового судна, розрахунок координат проєкцій проєктуючих променів пошукової апаратури суден, визначення довжини генерованих проєктуючих променів, спрямованих на виявлене скупчення риби тощо (таблиця 2).

На підставі цих даних розраховують координати скупчення риби і перевіряють їх точність. У випадку розбіжностей прорахованих по кожному із пошукових суден даних уточнюють кути нахилу та довжини проєктуючих променів радіолокаційної станції риболовного судна та аналогічні дані допоміжного пошукового судна (рис. 4).

Обговорення результатів дослідження і можливостей його промислового використання. Впровадження методик та засобів кінематичного проектування у практику промислового вилову риби незаперечно буде пов'язано із певними додатковими фінансовими затратами. Перш за все, доведеться придбати додатковий допоміжний плавучий засіб, наприклад, моторизований пошуковий катер та оснастити його гідроакустичною розвідувальною апаратурою. Додатково знадобляться ще і сучасна швидкодіюча обчислювальна техніка із відповідним її програмним забезпеченням. Необхідні будуть також надійні засоби радіозв'язку та передачі цифрової інформації між основним та допоміжним суднами.

Проте майже вдвічі збільшені площі пошукових переміщень, а відповідно і обстежених ділянок акваторій морської поверхні, до того ж при зменшенні сумарних витрат палива, відкривають обнадійливі перспективи на широке промислове застосування засобів кінематичного проектування для інтенсифікації пошуку скупчень риби. У загальному це пропорційно повинно зменшити трудозатрати на пошукові роботи.

Поряд з тим, використання кінематичного проектування для уточнення координат скупчень риби, а також для надання інформації про обсяги риби у виявлених її скупченнях полегшить команді риболовного судна у прийнятті зважених рішень стосовно доцільності промислового вилову риби саме із цього виявленого обстеженого її скупчення.

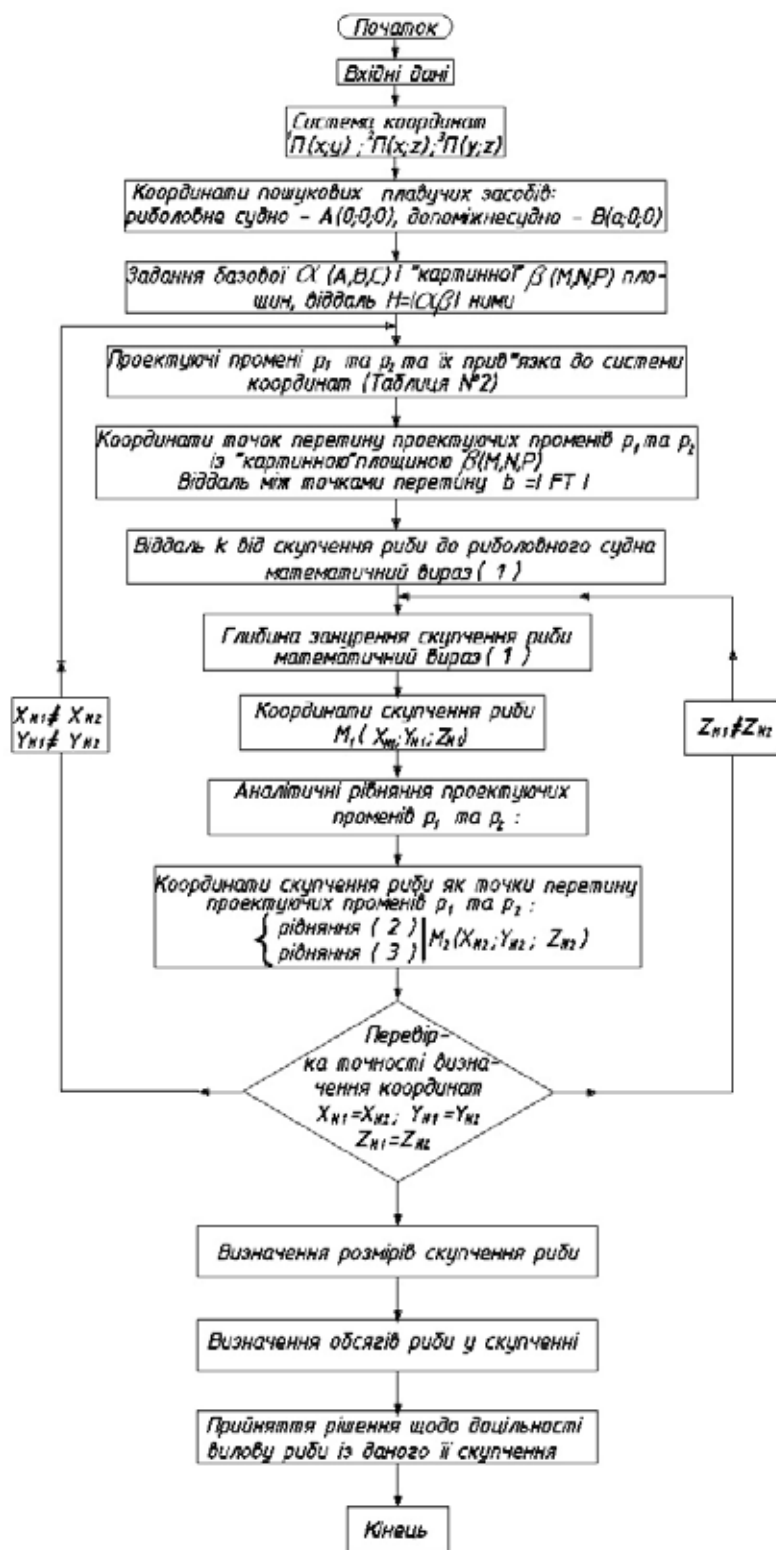


Рис. 4. Блок-схема розрахунків координат виявленого скупчення риби

Таким чином, виходячи з того, що використання для пошуків скупчень риби засобів кінематичного проектування спроможне майже на третину зменшити витрати палива на пошукові переміщення суден, тобто пропорційно на стільки ж збільшити площі обстежених пошукових ділянок, є цілком виправданим сподівання і на більш-менш пропорційне нарощування обсягів виловленої риби. Тому правомірно сподіватись, що грошові затрати на впровадження у промислове риболовство засобів кінематичного проектування повинні доволі швидко окупитись.

Так за наближеними підрахунками для відповідного оснащення риболовецького судна засобами кінематичного проектування, включно із придбанням допоміжного пошукового катера, гідроакустичної апаратури до нього та обчислювальної техніки із належним їй програмним забезпеченням знадобиться приблизно до 2,5–3 млн. грн. У даному випадку для наближених підрахунків доречно допустити, що на 1 км пошукових переміщень великотоннажне риболовне судно витратить приблизно 100 літрів дизельного палива вартістю біля 50 грн/л у цінах сьогодення. Також правомірно передбачити, що застосування додаткового пошукового моторизованого катера дозволить приблизно на 10 км зменшити пройдену основним риболовним судном відстань у кожному із його виходів на промисел.

Отже на кожному із виходів риболовного судна у море на промисел економія палива у середньому сягатиме біля 1000 літрів. У грошовому еквіваленті це становитиме $1000 \text{ л} \cdot 50 \frac{\text{грн}}{\text{л}} = 5 \cdot 10^4 \text{ грн}$. Тоді затрати на облаштування на даному судні засобів кінематичного проектування можуть бути відшкодованими за $\frac{2 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^4} = 40$ разів, тобто орієнтовно на 40 промислових виходів у море на промисел. А це орієнтовно лише один рік експлуатації риболовного судна. До того ж тут не враховано можливі прибутки від нарощування обсягів вилову риби завдяки збільшенню площі ділянок її пошуків.

Окрім інтенсифікації вилову риби Україною у акваторіях Чорного та Азовського морів, застосування кінематичного проектування дозволить збільшити вилов риби із порівняно неглибоких прісноводних водойм Дніпровського та Дністерського водних басейнів України. Забезпечиться це завдяки зменшенню негативного впливу хибних відбитих від дна водойми пошукових сигналів гідролокаторів, які нівелюються кінематичним проектуванням.

Незаперечно, викладений матеріал нашого теоретичного дослідження необхідно піддати ґрунтовій експериментальній перевірці. І бажано перевірці не у лабораторних умовах, а в умовах повноцінних прискіпливих натурних випробувань. Авторам цього теоретичного дослідження провести самотужки натурні випробування не вдасться. Тому запрошуємо усіх зацікавлених осіб, установ та організацій до спільних випробувань та подальшого промислового впровадження їх результатів.

Висновки.

1. Досвід промислового вилову риби у морських глибинах та великих прісноводних водоймах переконливо засвідчує, що із загальних трудозатрат на вилов риби до 60–70% їх обсягу припадає на пошук скупчень риби у межах виділених на її вилов ділянок водного плеса. Аналіз застосовуваної для пошуків риби апаратури та сучасних методик пошуків скупчень риби засвідчує потребу в теоретичному

обґрунтуванні методик пошуку із метою оптимізації трудозатрат на переміщення риболовних суден у пошуках промислово придатних скупчень риби.

2. Методика кінематичного проектування у застосуванні для пошуків скупчень риби дозволяють майже на третину скоротити пошукові переміщення риболовних суден та пропорційні цьому витрати палива на роботу привідних двигунів. Водночас застосування кінематичного проектування усуває вплив на точність визначення координат скупчень риби хибних відбитих від дна водойми зворотніх сигналів.

3. Основним джерелом додаткових витрат на запровадження кінематичного проектування для пошуків скупчень риби є потреба у допоміжному плавучому пошуковому судні, що оснащено гідроакустичною пошуковою апаратурою, а також облаштування на риболовному судні обчислювальної апаратури із належним їй програмним забезпеченням. Очікується, що ці додаткові витрати будуть покриті за 1–1,5 років активної експлуатації цього устаткування.

4. Застосування додаткових малогабаритних пошукових суден у 1,5–2 рази збільшує площу пошукових ділянок, пропорційно зменшуючи на 25–30% сумарні витрати палива на пошукові переміщення риболовного та допоміжного суден. Як оптимальна траєкторія пошукових переміщень суден рекомендується траєкторія по спіралі Архімеда із міжвитковим кроком, що пропорційний радіусу ефективної дії пошукової апаратури риболовного та допоміжного суден.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ю.Б.Юдович. Промысловая разведка рыбы. М.: Пищевая промышленность. 1974 – с. 238.
2. Афтаназів І.С., Стоцько Р.З., Шевчук А.О., Строган О.І., Бойко О.О. Визначення координат та параметрів руху безпілотних літальних апаратів. *Системи озброєння і військова техніка*. 2022. №3. (71) С. 49–59.
3. Svidrak I. G., Aftanaziv I. S., Shevchuk L. I., Strogan O. Determination of coordinates of unmanned aircrafts by means of kinematic projection *Mathematical Modeling and Computing*, – 2022. Vol. 9, № 2. P. 459–469. doi: <https://doi.org/10.23939/mmc2022.02.459>
4. Тикунов А.И. Рыбопоисковые приборы и комплексы: Учебник. Л.: Судостроение, 1989. 288 с: ил.
5. Кудрявцев В. И. Развитие средств гидроакустической телеметрии и телеуправления в рыбохозяйственной отрасли. *Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ) 154 Труды ВНИРО*. 2018. Т. 170. С. 153–183.
6. Кудрявцев В.И. Гидроакустика рыбохозяйственная. *Учебное пособие*. М.: Изд-во ВНИРО, 2018. С. 460
7. Павлов Г.И. Промысловые гидроакустические приборы / Г.И. Павлов. М.: Агропромиздат, 2017. С. 286
8. Давыдов В.С., Нгуен Т.Т., Хренов М.Ю. Методы повышения дальности распознавания рыбных скоплений на фоне донных отражений, «*Радиоэлектроника известия высших учебных заведений России*». Выпуск 1. 2004, С. 17–26.

9. Букатый В.М. Поиск объектов промысла. *Калининград*, 2000. С. 208.
10. О.П. Калиновська, В.В. Глоговський, І.Г. Пулькевич. Локаційні задачі кінематичних проєкційних відображень. Пр. Льв. *Міжнар. наук.-метод. конф. з геометричного моделювання, інж. та комп. граф.* Л., 1994. С. 37.
11. О.П. Калиновская, В.В. Глоговский, И.Г. Пулькевич. К проблеме единой теории проекционных отображений. *Прикл. геом. и инж. граф.* – Вып. 57 – 1994, С. 45–50
12. Афтаназів І. С., Шевчук Л. І., Строган О. І., Струтинська Л. Р Вдосконалення пошуку скупчень риби засобами кінематичного проєкування. *Судноводіння* 2022. – Вип. 33. – С. 18–31.

REFERENCES

1. Judovich Ju. B. (1974). Industrial exploration of fish [Pishhevaja-promyshlennost]. *Promyslovaja razvedka ryby*, 238, [in Russian].
2. Aftanaziv I.S., Stoc'ko R.Z., Shevchuk A.O, Strohan O.I., Bojko O.O. (2022). Determination of coordinates and movement parameters of unmanned aerial vehicles [Vyznachennja koordynat ta parametriv ruhu bezpilotnyh lital'nyh aparativ]. *Systemy ozbrojennja i vijs'kova tehnika*, 3 (71), 49–59. [in Ukrainian].
3. Svidrak, I.G., Aftanaziv, I.S., Shevchuk, L.I. & Strohan, O.I. (2022). Determination of coordinates of unmanned aircrafts by means of kinematic projection. *Mathematical Modeling and Computing*, 9(2), 459–469. doi: <https://doi.org/10.23939/mmc2022.02.459>. [in English].
4. Tykunov A.Y. (1989). Fish-searching devices and complexes [Rybopouyskovye prybory y kompleksy]. *Uchebnyk Sudostroenye*, 288. [in Russian]
5. Kudrjavcev V. Y. (2018). Development of means of hydroacoustic telemetry and telecontrol in the fishery industry [Razvytye sredstv gydroakustycheskoj teletmetryy y teleupravlenija v rybohozajstvennoj otrasly]. *Vserossyjckij nauchno-ysledovatel'skij ynstitut rybnogo hozjajstva y okeanografyy (FGBNU)*, 170, 153–183. [in Russian].
6. Kudrjavcev V.Y. (2018). Hydroacoustics for fisheries [Gydroakustyka rybohozajstvennaja]. *Uchebnoe posobyje*, 460. [in Russian].
7. Pavlov G.Y. (2017). Field hydroacoustic instruments [Promyslovyje gydroakustycheskye prybory]. G.Y. Pavlov. *Agropromyzdat*, 286, [in Russian].
8. Davydov B.C., Nguen T.T., Hrenov M.Ju. (2004). Methods for increasing the range of recognition of fish clusters against the background of bottom reflections [Metody povyshenija dalnosity raspoznavanija rybnyh skoplenij na fone donnyh otrazhenij]. *Radyolektronika yzvestija vysshyh uchebnyh zavedenij Rossyy*, 1, 17–26. [in Russian].
9. Bukatj V.M. (2000). Search for fishery objects [Poysk ob'ektov promysla]. *Kalynyngard*, 208, [in Russian]

10. Kalynovska O.P., Glogovskyj V.V., Pulkevych I.H. (1994). Location problems of kinematic projection mappings [Lokacijni zadachi kinematychnyh proekcijnyh vidobrazhen] *Mizhnar. nauk.-metod. konf. z geometrychnogo modeljuvannja, inzh. ta komp. graf.* 37, [in Russian].
11. Kalynovskaja O.P., Glogovskyj V.V., Pulkevych I.H. (1994) On the problem of a unified theory of projection mappings [K probleme edynoj teoryy proekcyonnyh otobrazhenyj]. *Prykladnaja heometryja i inzhenernaja hrafiika* 57, 45–50, [in Russian].
12. Aftanaziv I.S., Shevchuk L.I., Strogan O.I., Strutyns'ka L.R. (2022). Improving the search for fish clusters by means of kinematic design [Vdoskonalennja poshuku skupchen' ryby zasobamy kinematychnogo proektuvannja]. *Sudnovodinnja*, 33, 18–31, [in Ukrainian].

**THE PRACTICAL ASPECTS OF REDUCING THE LEVEL
OF ACCIDENTS ON CITY ROADS BY FORMING
A SAFETY PROFILE**

G.O. Weigang¹, K.V. Komar²

¹PhD, Associate Professor, Department of Cybersecurity
Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-2082-2322

²Assistant Department of Cybersecurity
Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0001-6764-3746

Summary

Introduction. Recent decades have been characterized by high rates of motorization. At the same time, Ukraine has one of the highest rates of deaths and injuries as a result of road accidents among European countries, and the level of road safety organization remains extremely low. An analysis of international practice has shown that the infrastructure of streets and highways in Ukrainian cities does not fully meet modern requirements. During their construction and reconstruction, ground and underground pedestrian crossings and special bicycle lanes are not always arranged, which could significantly reduce the level of road traffic injuries and deaths.

Therefore, analyzing the main reasons for the insufficient level of road safety is one of the steps towards making effective decisions to reduce the risk of road accidents.

Purpose. The main purpose of this article is to study the experience of implementing low-risk road infrastructure in the cities of the European Union and compare it with the conditions of traffic management in Ukrainian cities.

Results. The analysis of the factors influencing the level of mortality and injuries due to road accidents contributed to the formation of a road safety profile, which is a triad of interaction between three systems in the environment. The study made it possible to assess the level of safety in the organization of traffic on identical sections of urban infrastructure in Rzeszow (Poland) and Kyiv (Ukraine). The paper presents the comparison criteria and parametric indicators of the sections of the road transport network of the cities.

Conclusions. Based on the calculations, the most critical points are identified and the conditions for safe traffic management are outlined. Taking into account the directions of strategic and territorial development of Kyiv, the main measures for the development of the city's street and road network are determined, taking into account the experience of the European analog.

Key words: street and road network, traffic safety profile, traffic safety profile triad, accident rate, traffic flow, critical points, traffic organization.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРОФІЛЮ БЕЗПЕКИ ОРГАНІЗАЦІЇ РУХУ
ВУЛИЧНО-ДОРОЖНЬОЇ МЕРЕЖІ МІСТ

Г.О. Вайганг¹, К.В. Комар²

¹к.т.н., доцент кафедри кібербезпеки,
Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів, Україна
ORCID ID: 0000-0002-2082-2322

²асистент кафедри кібербезпеки,
Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів, Україна
ORCID ID: 0000-0001-6764-3746

Анотація

Вступ. Останні десятиліття характеризуються високими темпами автомобілізації. Водночас Україна має один з найвищих показників смертності та травматизму внаслідок дорожньо-транспортних пригод серед європейських країн, а рівень організації безпеки дорожнього руху залишається вкрай низьким. Аналіз міжнародної практики показав, що інфраструктура вулиць і магістралей в українських містах не повною мірою відповідає сучасним вимогам. Під час їх будівництва та реконструкції не завжди облаштовуються наземні та підземні пішохідні переходи, спеціальні велосипедні доріжки, які могли б суттєво знизити рівень дорожньо-транспортного травматизму та смертності.

Тому аналіз основних причин недостатнього рівня безпеки дорожнього руху є одним із кроків до прийняття ефективних рішень щодо зниження ризику виникнення дорожньо-транспортних пригод.

Мета. Основною метою цієї статті є дослідження досвіду впровадження дорожньої інфраструктури низького ризику в містах Європейського Союзу та порівняння його з умовами організації дорожнього руху в містах України.

Результати. Аналіз факторів, що впливають на рівень смертності та травматизму внаслідок ДТП, сприяв формуванню профілю безпеки дорожнього руху, який являє собою тріаду взаємодії трьох систем у навколишньому середовищі. Дослідження дозволило оцінити рівень безпеки при організації дорожнього руху на ідентичних ділянках міської інфраструктури в Жешуві (Польща) та Києві (Україна). Наведено критерії порівняння та параметричні показники ділянок дорожньо-транспортної мережі міст.

Висновки. На основі проведених розрахунків визначено найбільш критичні точки та окреслено умови для безпечної організації дорожнього руху. З урахуванням напрямів стратегічного та територіального розвитку Києва визначено основні заходи щодо розвитку вулично-дорожньої мережі міста з урахуванням досвіду європейського аналогу.

Ключові слова: вулично-дорожня мережа, транспортний потік, перехрестя, організація руху.

Introduction. Problem statement. The increase in the number of vehicles in cities and the growth of traffic intensity have led to a decrease in traffic speed, delays at transport hubs, deterioration of traffic conditions, increased pollution and noise levels in cities, and an increase in accidents on the street and road network. This has necessitated the search for effective measures to eliminate these negative

consequences on the example of the organization of the street and road network of European cities.

The increase in the number of cars in the largest cities of Western Europe, which began in the 50s of the last century, followed almost the same pattern for all countries: a linear increase in the number of cars to the level of 300–350 cars/1000 inhabitants, then a slowdown in the growth trend and stabilization at the level of 550 ± 50 cars/1000 inhabitants [1]. A limit of saturation with individual cars was adopted, after which the level of motorization stabilizes, and only the rotation of the fleet takes place [2].

In order to find ways to ensure the effective functioning of the city's SRN, it is necessary to analyze the basic principles of improving the transport and operational qualities of city streets and roads, ensuring road safety, and increasing their capacity. To improve the efficiency of vehicles in the urban environment, the speed of cargo delivery and passenger transportation.

Research statement. Road safety is one of the main criteria for evaluating transportation systems. As a result, one of the primary tasks of optimizing transport systems is to improve road safety. A road is a complex dynamic system that includes a set of human-vehicle-road elements that operate in a certain environment. These elements are interconnected with each other and form an integrated transportation system. From the point of view of road safety, both the risk factors themselves and their various combinations are of interest for systematic study.

Literature review. It is known that about 75% of road accidents occur in cities, and more than half of them are concentrated in the areas of intersections of transport highways [3]. Therefore, the problem of traffic organization and safety is the most important urban planning task, the correct solution of which determines the reliability and quality of the entire urban transport system and the possibility of implementing the necessary engineering and technical solutions, including those to reduce the level of road accidents [4]. In different countries, scientists use far from identical methods of organizing traffic flows, as there is no general, universal solution to this problem. To ensure the safe passage of vehicles at any time of the year, it is important to constantly monitor the condition of roads, timely identify structural elements and areas requiring urgent repair, and a detailed assessment of traffic conditions of different densities. To perform these works, comprehensive road condition survey plans are required, which are used to develop measures to improve traffic conditions.

Main part. Traffic flow is a complex system that includes vehicles, roadways and the environment, which includes all street and road arrangements and pedestrian traffic. The basic principle of the traffic flow system is the integrity of the traffic process, where the integrity of the flow is primary and the position and speed of vehicles in the flow is secondary [5].

The analysis of a priori information and technical and legal documentation allowed us to conduct a systematic analysis of the interaction of the components of the TFC and the factors influencing the safe organization of traffic (Fig. 1). This served as the basis for the formation of the conceptual principles of the safety profile to identify the causes of road accidents and reduce the occurrence of dangerous situations on the roads.

Research has shown that such scientists as Guk V.I. and Stepanchuk O.V. [6, 7] suggest that the main reasons that reduce traffic safety are a few characteristic features

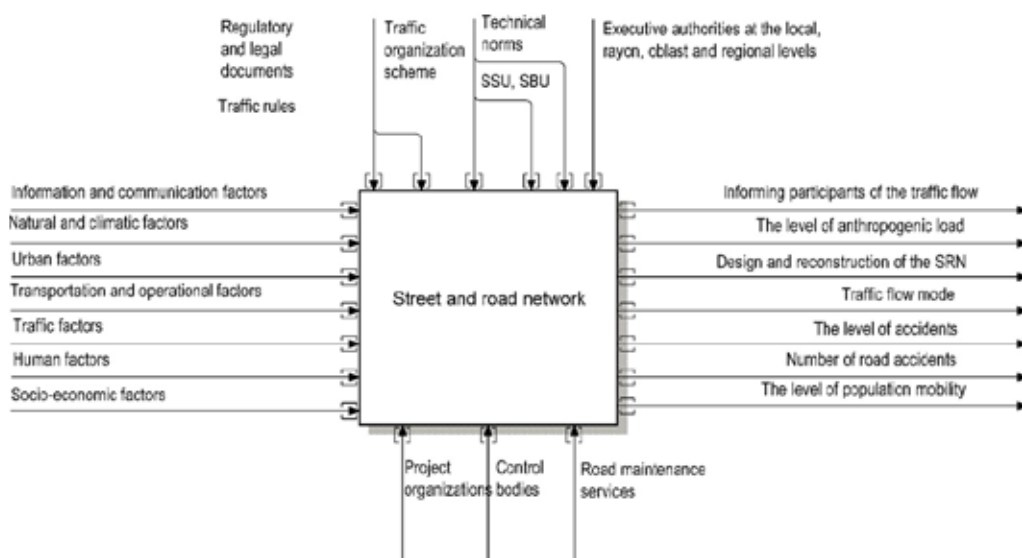


Fig. 1. Conceptual scheme of street and road network functioning

of the road and traffic flow, such as insufficient width of the roadway; insufficient visibility; sharp unexpected change of road direction; intersection with unregulated traffic flow; lack of acceleration and braking lanes; bus stops without smooth adjacencies to the roadway; steep ascents and descents, etc. Statistical information on road accidents provides a fundamental opportunity for a comparative assessment of the degree of traffic safety under different parameters of the road elements and traffic intensity on the road.

Thus, the parameters that significantly affect the situation during traffic and ensure safety can be represented as a triad of individual street and road network systems and road users (Fig. 2). This analysis was the basis for the formation of the traffic safety profile.

An analysis of the number of accidents on Western European roads showed that their number is lower than in Ukraine. Therefore, we will compare similar sections of the urban road network and their operating conditions.

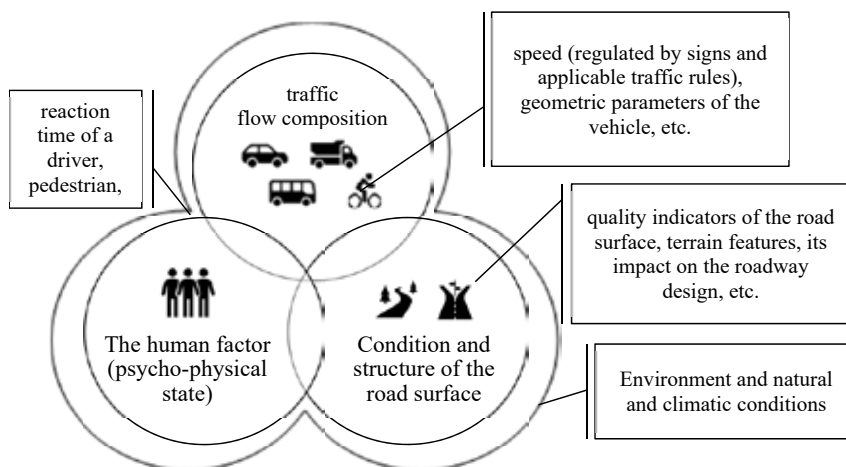


Fig. 2. Triad of the traffic safety profile

As the main criteria for the comparative analysis of traffic organization at the junctions of the urban road network in Kyiv (Ukraine) and Rzeszow (Poland), several parameters of the street and road network and the road transport system were considered, which are given in Table 1 [8, 9].

In accordance with the methods [9, 10], based on the data in Table 1, we calculated and analyzed the quantitative indicators of traffic flow in Kyiv (Ukraine) and Rzeszow (Poland). The initial data and their corresponding calculation coefficients, traffic conditions at each of the intersections and adjacent streets, and the ranges of calculations under different traffic conditions were considered. In addition to the geometric parameters of the street and road network, a number of other parameters were considered [11].

The quantitative indicators of the triad are presented in Table 2, which makes it possible to evaluate and compare their values.

The essential elements of influence on the situation on the road by road users are primarily the composition of the traffic flow. The analysis of traffic flow on the city streets of the studied cities of Ukraine and Poland showed that there are differences in the types of vehicles and their technical and operational characteristics, which differ significantly from each other. Therefore, its composition plays an important role in shaping traffic conditions. The share of mass passenger transport on main city streets is 3–25%; trucks 2–15%; cars 60–95% [12, 13]. Such a range of changes in indicators depends on a number of factors, namely: time of day, day of the week, city district and its main function. The real traffic flow has a stochastic nature of movement, which depends on random changes in the traffic situation and individual characteristics of vehicle drivers, so the capacity of the street and road network is subject to statistical patterns of traffic flow.

Table 1

Criteria comparing the elements of the SRN

	Rzeszow (Poland)		Kyiv (Ukraine)	
	A. Asnyk str.	J. Pilsudski Ave.	Aviakonstruktora Antonova str.	Chokolovsky Boulevard
Lane width, m	3,5	3,75	3,75	3,5
Width of the roadside, m	3	3,75	3,37	3
Presence of side obstacles	Yes	Yes	Yes	Yes
Visibility distance, m	250–350	250–350	>350	250–350
Curve radius in plan, m	<100	100–250	100–250	<100
Speed limit, km/h	50	60	60	50
Share of cars turning left, %	20	20	20	20
Condition of the pedestrian sidewalk	Solid coating	Solid coating	Solid coating	Solid coating
Coating type	Cement concrete	Cement concrete	Asphalt concrete	Asphalt concrete
Marking type	Axial and edge	Axial and edge	Axial and edge	Axial and edge
Bandwidth	700	2000	2000	700

Table 2

Quantitative indicators of traffic flow

	Rzeszow (Poland)		Kyiv (Ukraine)	
	A. Asnyk str.	J. Pilsudski Ave.	Aviakonstruktora Antonova str.	Chokolovsky Boulevard
T_p – driver reaction time, s;	1	1	1	1
T_{cp} – brake actuator response time, s	0,3	0,35	0,4	0,27
K_e – braking efficiency coefficient;	1	1,5	1,35	1,2
φ – the coefficient of tire adhesion to the road surface;	0,7	0,65	0,7	0,62
I – road slope;	0	0,2	0,2	0
L_v – overall length of the vehicle, m;	4	4	4	4
S_r – the value of the reserve, m;	4	5	5	4
V_0 – minimum speed, km/h.;	50	60	60	50
α – speed reduction factor, which depends on the composition of the TF.	0,008	0,005	0,0045	0,0085

To analyze and calculate, we selected statistical data on changes in the dynamics of the traffic situation over time on identical sections of the SRN in Kyiv and Rzeszow (Fig. 3). Monitoring of quantitative indicators of traffic flow made it possible to obtain average statistical data and, using mathematical dependencies, to model their change within 24 hours for both options.

When determining the quantitative indicators of traffic flow, the presence or absence of traffic control devices, pedestrian crossings, safety islands, adjacent buildings, parking spaces and the degree of infrastructure development, location in relation to the city center, and population density in the area were taken into account.

The structural elements and parameters of the street and road network of the study sites and the condition of the roadway made it possible to evaluate and verify the results of the calculations and their adequacy in practice.

It is impossible to completely prevent accidents, as the causes of accidents are not only unfavorable road conditions, but also the influence of many factors that relate to



a) Intersection of Y. Pilsudskoho Avenue and A. Aznuka Street

b) Intersection of Chokolovsky Boulevard and Aviakonstruktora Antonova Street

Fig. 3. Schematic representation of urban road network nodes

both traffic conditions on the road and the impact of the traffic flow itself, an individual car, the human factor (drivers and pedestrians), weather conditions, etc. [14].

Based on the results of the calculations, a comparative analysis of the experimental sections of the SRN was carried out and the hazardous areas were identified. The risk assessment of road accidents considers the analysis of critical points on the road sections and decision-making to increase their level of danger. The identified critical points take into account the peculiarities of vehicle movement. The study of the SRN section in Rzeszow (Fig. 4a) showed that the most dangerous places are the intersections of traffic flows 1, 2, 5 and 1, 6, 7. These locations are shown in Figure 4a.

As for the Kyiv SRN section, which corresponds to the indicators of the Rzeszow SRN section (Fig. 4b), the critical points are the intersection of the 2nd, 3rd, 4th and the distribution point of the 1st traffic flow. The calculated indicators were confirmed by practical observations [15].

At each of the SRN nodes, the safety profile triad was evaluated and the dynamics of changes in the level of traffic safety at speeds from 10 to 80 km/h was calculated. This range was chosen based on speed limits, terrain and design features of the SRN in these areas. The calculations did not take into account static indicators, such as the design parameters of the SRN, but only dynamic and psychophysiological (for the driver).

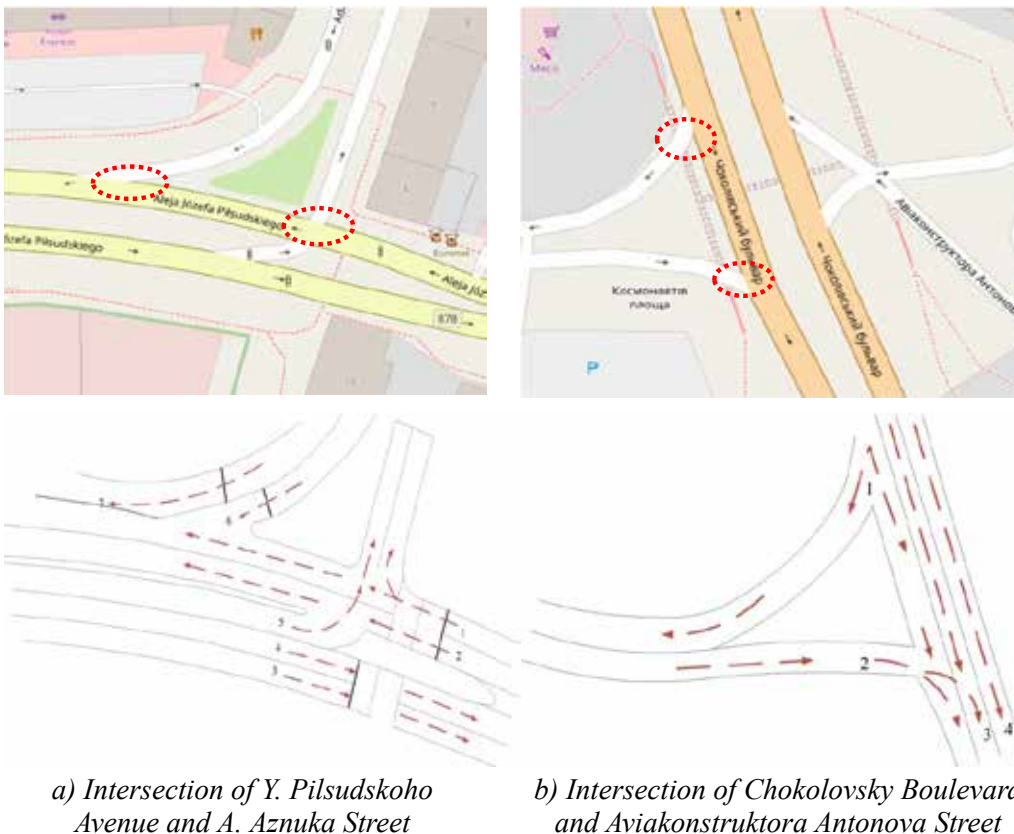


Fig. 4. Schematic representation of critical points and hazard environments at the nodes of the urban road network

Based on the data in Tables 1 and 2, we mathematically processed the criteria presented in Table 3, which are the components of both vehicle trajectory safety and traffic flow.

The analysis of the research results and calculations showed that the numerical values correspond to the permitted speed limits on the studied sections. For example, calculations are presented at a speed of 50–60 km/h in accordance with the regulated speed limits on the sections during the day. The results of the calculations for the main and secondary roads in both cases and their difference are within the normal range, and the calculated value of the braking distance (S_b) corresponds to the designed values.

The values of the actual throughput (N_ϕ) and the calculated throughput taking into account unfavorable situations and emergency braking (N_{max} , N_{max}) do not exceed

Table 3

Results of calculating road capacity and density of vehicles

50–60 km/h.	Rzeszów (Poland)		Kyiv (Ukraine)	
	A. Asnyk str.	J. Pilsudski Ave.	Aviakonstruktora Antonova str.	Chokolovsky Boulevard
S_p – is the vehicle path during the driver's reaction time, m	13,89	16,67	13,89	16,67
S_{cp} – is the vehicle distance during the brake actuation, m	4,17	5,83	3,75	6,67
S_t – is the size of the braking distance, m	14,06	32,71	19,05	27,33
S_o – braking distance, m	32,12	55,21	36,69	50,67
L_d – safety distance, m	40,12	64,21	44,69	59,67
L_{TY} – is decreased value of the vehicle's dynamic dimension, m	24,06	36,60	26,34	34,33
t_{ip} – is the time after which cars will pass one after the other through the road intersection, observing the safety distance, s	2,89	3,85	3,22	3,58
t_{ip}' / taking into account the reduced value of the vehicle's dynamic dimension, s	1,73	2,20	1,90	2,06
N_{max} – is the capacity of the road section, car/hour,	1246,40	934,50	1000,88	1005,60
N_{max}' – is the capacity of a road section, taking into account the reduced value of the dynamic size of the vehicle, car/hour,	2078,34	1639,22	1897,98	1747,60
V – average flow speed, km/h.	40,03	55,33	40,49	55,47
V_{cp} – average flow speed, taking into account the reduced value of the vehicle's dynamic dimension km/h.	33,37	51,80	33,87	52,14
q – traffic flow density, cars/km,	24,93	15,58	22,38	16,76
q' – traffic flow density, taking into account the reduced value of the vehicle's dynamic dimension, cars/km,	41,57	27,32	37,96	29,13
N_ϕ – actual throughput of the sections, car/hour	601,30	1844,92	530,60	1661,23

the permissible values, and therefore no structural changes are required at the existing SRN nodes, only organizational measures are needed to regulate traffic flows at the junctions (for regulated intersections) and within a block distance from the intersection (for unregulated intersections) and the use of GPS beacons to respond quickly in case of emergencies or to inform road users about the situation on this section of the road, which is quite relevant during peak hours.

The speed limits are justified for this range of vehicle movement (50–60 km/h). However, calculations and observations have shown that increasing the speed to 70–80 km/h leads to accidents on both sections, which in 65% of cases are caused by the human factor and psycho-physiological characteristics of drivers.

According to Table 3, other calculations were carried out in the range of 10–80 km/h. The mathematical dependencies of changes in traffic flow indicators – throughput and average speed – allowed us to graphically assess their dynamism (1):

$$\begin{aligned} N_{\max} &= f(V_a) \\ N'_{\max} &= f(V_a) \\ V_{cp} &= f(V_a) \\ V'_{cp} &= f(V_a) \end{aligned} \quad (1)$$

The graphical interpretation of the calculation results showed that on the studied sections of the SRN (Fig. 5, Fig. 6) there is a clear decrease in traffic capacity when leaving the junctions and intersections. The maximum throughput values are achieved at traffic speeds of 35–45 km/h.

The analysis of the graphs showed that there is a direct proportional relationship between the average speed and traffic capacity at road junctions and intersections. In this case, the presence of traffic lights and other means of traffic management can be ignored.

In the calculations, 80 km/h was proposed as the maximum value of the speed range, because, despite the design and parametric features of the studied sections, the time intervals when the car can move with a higher value on the speedometer are minimal in relation to the total time used for the calculations.

Conclusion. The result of mathematical processing allowed us to confirm compliance with the designed requirements for the qualitative and quantitative indicators of these transport nodes of the city's street and road network.

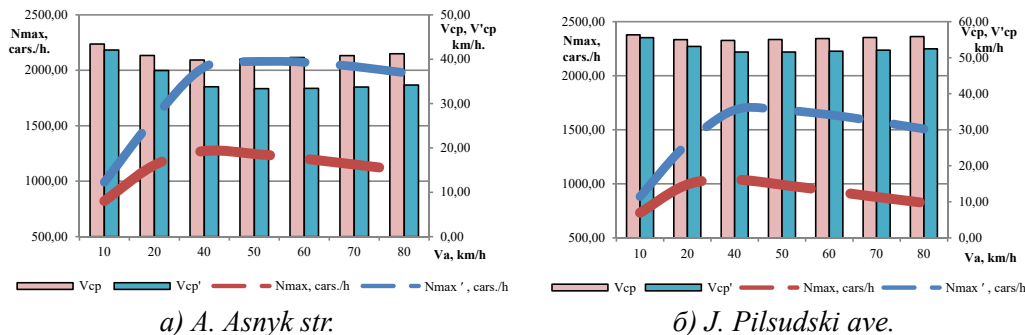


Fig. 5. Graphical dependencies of capacity and average speed at a controlled intersection

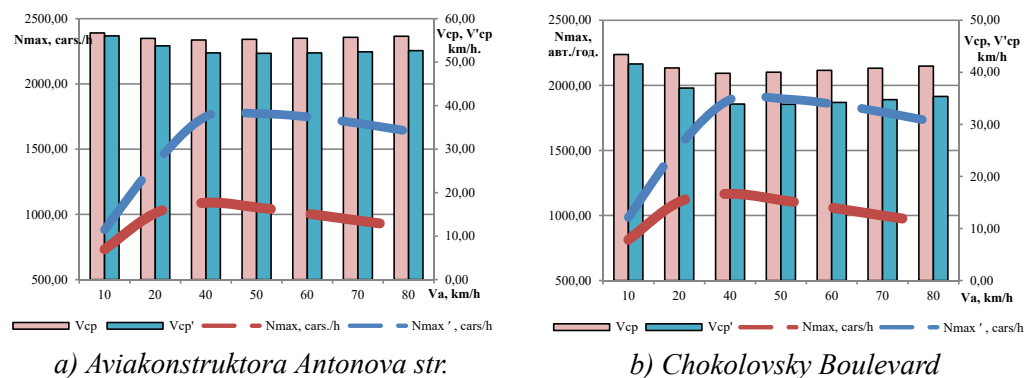


Fig. 6. Graphical dependencies of capacity and average speed at an unregulated intersection

As an indicator of the effective organization of traffic flows is the minimum value of peak conditions and accidents. Therefore, the traffic safety profile took into account the experience of Western European countries to improve the level of vehicle safety. The analysis of statistical information [2, 7] on the causes of traffic accidents showed the awareness of all categories of users of the SRN due to technical means of traffic organization and modernization of existing elements of the traffic management system. This helps to reduce accidents, but cannot completely eliminate the peculiarities of the psychophysical state of the population, both on the part of drivers and pedestrians in real time.

Conclusions. As the practice shows, the modernization and reconstruction of road traffic facilities is not always feasible and economically justified. Therefore, the formation and analysis of a traffic safety profile will help identify the most effective solutions to reduce road accidents and hazards in urban areas. One of the most effective means is to develop not the entire city network, but only its information component and communication between its elements.

Thus, the rational use of the existing transport network to improve the safety of the SRN includes such measures as the distribution of transport by lanes and adjacent streets and highways to optimize road congestion, prevent and avoid congestion, and prompt notification of emergencies and emergencies on the transport and road network.

REFERENCES

1. Fornalchuk Ye.Iu., (Ed). (2018). Mohyla I.A., Trushevskiy V.E., Hilevych V. V. *Traffic management at controlled intersections in cities [Upravlinnia dorozhnim rukhom na rehulovanykh perekhrestyakh u mistakh]* Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki. (in Ukrainian)
2. Lutsyk O., Stepanchuk O., Bieliatynskiy A., Pylypenko O. (Eds.). (2013). *Peculiarities of Passenger Transportation Traffic in Kyiv City. Transbaltica: 8th International Scientific Conference.* Vilnius: Technika. (in Ukrainian)
3. Global Plan for the Decade of Action for Road Safety 2011–2020. (2022, December). Retrieved from: https://www.who.int/roadsafety/decade_of_action. (in English)

4. Statistics of accidents in Ukraine by the Road Safety Administration. [Statystyka avariinosti v Ukraini Upravlinnia bezpeky dorozhnoho rukhu]. (2020). (2022, December). Retrieved from: <http://patrol.police.gov.ua/statystyka> (in Ukrainian)
5. Huk V.Y. (Ed). *Elements of traffic flow theory and design of streets and roads* [Elementu teoriiy transportnykh potokiv y proektyvani vulyts i dori] (1991) Kyiv: UMK VO. (in Ukrainian)
6. Huk V.I., Shkodovskiy Yu.M. (Eds.). (2009). *Traffic flows: theories of their use in urban planning* (Transportni potoky: teoriia yikh zastosuvannia v urbanistytsi). Kharkiv: Zoloti storinky. (in Ukrainian)
7. Stepanchuk O.V. (Ed.) (2018). Methodology for improving the efficiency of the fog lane [Metodolohiia pidvyshchennia efektyvnosti funktsionuvannia vulychno-dorozhnoi merezhi mist]. (Doctor of technical science). National Aviation University, Kyiv. (in Ukrainian)
8. Mapa Rzeszow, plan miasta Rzeszow. (2022, December). Retrieved from: https://mapa.nocowanie.pl/rzeszow/ulice/ulica_adama_asnyka (in English)
9. OpenStreetMap is the free wiki world map. (2022, December). Retrieved from: <https://www.openstreetmap.org/#map=14/50.4317/30.4548> (in English)
10. DSTU 8824:2019 *Automobile roads. Characteristics of the intensity of the hand of the transport stream flow*. [Avtomobilni dorohy. Vyznachennia intensyvnosti rukhu ta skladu transportnoho potoku.] (2019) Tekhnichnyi komitet standartyzatsii TK 307 Avtomobilni dorohy i transportni sporudy. (in Ukrainian)
11. Polishchuk V.P., Dziuba O.P. (Eds.). (2007). *Theory of transport: metody and model of organization of road transport* [Teoriia transportnoho potoku: metody i modeli orhanizatsii dorozhnoho rukhu]. Kyiv: NTU. (in Ukrainian)
12. Stepanchuk O.V., Timkina Yu. (2015). *Analysis of design features of public passenger transport stops on main streets* [Analiz osoblyvostei proektuvannia zupynok hromadskoho pasazhyrskoho transportu na mahistralnykh vulytsiakh]. *Naukoiemni tekhnolohii*. 3 (27). 266–270. (in Ukrainian)
13. Binder R., Lancaster Z., (2019). Transport modeling with a purpose: how urban systems design can bridge the gaps between modeling, planning, and design. *Wit Transactions on the Built Environment*. 186. 85–96. 10.2495/UT190081.
14. *Stan sprav avariinosti na transporti v Ukraini za 2020 rik*. (2020) Dyrektorat z bezpeky na transporti. m. Kyiv. Ministerstvo infrastruktury ukrainy. (in Ukrainian).
15. Weigang G., Komar K. (Eds.). (2021). Ensuring compliance with international requirements for efficient traffic management in inner city areas Problems with traffic flows and directions of their solution: abstracts of the IV All-Ukrainian scientific and theoretical conference. 27–29. (in English).

ЛІТЕРАТУРА

1. Формальчик Є.Ю., Могила І.А., Трушевський В.Е., Гілевич В.В. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. 236 с.
2. Lutsyk O., Stepanchuk O., Bieliatynskiy A., Pylypenko O. Peculiarities of Passenger Transportation Traffic in Kyiv City. *Transbaltica: 8th International Scientific Conference*. Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius: Technika, May 9-10, 2013. 2013. P. 117–121.
3. Global Plan for the Decade of Action for Road Safety 2011–2020. URL: https://www.who.int/roadsafety/decade_of_action. (дата звернення: 03.05.2020).
4. Статистика аварійності в Україні [Електронний ресурс] Управління безпеки дорожнього руху. URL: <http://patrol.police.gov.ua/statystyka> (дата звернення: 03.05.2020).
5. Гук В.И. Элементы теории транспортных потоков и проектирования улиц и дорог Київ.: УМК ВО, 1991. 255 с.
6. Гук В.І., Шкодовський Ю.М. Транспортні потоки: теорія їх застосування в урбаністиці. Харків: Золоті сторінки, 2009. 232 с.
7. Степанчук О.В. Методологія підвищення ефективності функціонування вулично-дорожньої мережі міст: дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.20. 2018. 458 с.
8. Мапа Rzeszów, plan miasta Rzeszów. URL: https://mapa.nocowanie.pl/rzeszow/ulice/ulica_adama_asnyka (дата звернення: 12.10.2021).
9. OpenStreetMap is the free wiki world map. URL: <https://www.openstreetmap.org/#map=14/50.4317/30.4548> (дата звернення: 12.10.2021).
10. ДСТУ 8824:2019 Автомобільні дороги. Визначення інтенсивності руху та складу транспортного потоку. [Чинний від 2019-10-01]. Технічний комітет стандартизації ТК 307 «Автомобільні дороги і транспортні споруди», 2019. 57 с.
11. Поліщук В.П., Дзюба О.П. Теорія транспортного потоку: методи і моделі організації дорожнього руху. Навчальний посібник. Київ: НТУ, 2007. 158 с.
12. Степанчук О.В., Тімкіна Ю. Аналіз особливостей проектування зупинок громадського пасажирського транспорту на магістральних вулицях *Наукоємні технології* 2015. Випуск №3 (27). С. 266–270.
13. Binder, Robert & Lancaster, Zachary & Tobey, Michelle & Jittrapirom, Peraphan & Yamagata, Yoshiki. TRANSPORT MODELING WITH A PURPOSE: HOW URBAN SYSTEMS DESIGN CAN BRIDGE THE GAPS BETWEEN MODELING, PLANNING, AND DESIGN. *WIT Transactions on the Built Environment*. 2019 Vol. 186. P. 85–96. 10.2495/UT190081.
14. Стан справ аварійності на транспорті в Україні за 2020 рік. Міністерство інфраструктури України. Директорат з безпеки на транспорті. Київ. 2019. 134 с.
15. Weigang G, Komar K. Ensuring compliance with international requirements for efficient traffic management in inner city areas. *Проблеми з транспортними потоками і напрямки їх розв'язання* : тези доповідей IV Всеукраїнської науково-теоретичної конференції, 25–26 березня 2021 року, Львів. 2021. С. 27–29.

**РОЗРОБКА ПРОЄКТІВ АЛЬТЕРНАТИВНИХ СПОСОБІВ ДОСТАВКИ
ЗОВНІШНЬОТОРГОВЕЛЬНИХ ВАНТАЖІВ У ПЕРІОД ВОЄННОГО
ЧАСУ ЗА УЧАСТЮ ЛОГІСТИЧНИХ ПОСЕРЕДНИКІВ**

Є.М. Лебідь¹, Н.О. Лужанська², І.Г. Лебідь³

¹к.т.н., доцент, доцент кафедри «Транспортне право та логістика»,
Національний транспортний університет, Київ, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-1794-8060

²к.т.н., доцент, доцент кафедри «Міжнародні перевезення та митний контроль»,
Національний транспортний університет, Київ, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-1271-8728

³к.т.н., доцент, професор кафедри «Міжнародні перевезення та митний контроль»,
Національний транспортний університет, Київ, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-0707-4179

Анотація

Вступ. З початку війни в Україні у суб'єктів ринку транспортних послуг виникла гостра потреба у пошуку альтернативних рішень щодо доставки товару у міжнародному сполученні. Особливої уваги потребує розробка маршрутів перевезення вантажів, що до війни транспортувалися до портів та аеропортів України. **Мета.** Основна задача, що сьогодні стоїть перед логістичними посередниками, це формування проєктів логістичних ланцюгів з урахуванням можливих зовнішньоторговельних ризиків та забезпеченням мінімізації вартості та тривалості доставки. При цьому, фахівцями підприємств повинні бути враховані технічні, технологічні та організаційні обмеження, що можуть виникати на об'єктах інфраструктури, а також як це впливатиме на їх пропускну спроможність. **Результати.** Розроблено проєкти постачання товарів з Китаю до України з залученням послуг морських портів, що знаходяться у Польщі, Латвії та Румунії. За кожним з маршрутів визначено вартість та тривалість доставки, розглянуто процес перевезення вантажу від вказаних портів до замовника автомобільним транспортом. Сформульовано рекомендації щодо застосування стратегій прийняття управлінських рішень в залежності від потреб замовника. **Висновки.** Розробка альтернативних проєктів постачання товарів у міжнародному сполученні наразі досить актуальна для ринку України та іноземних контрагентів. Першочерговою є задача планування логістичного ланцюга та всіх етапів організації транспортного процесу. З метою досягнення скорочення транспортної складової витрат у вартості реалізації товару кінцевому споживачу здійснюється низка заходів, що забезпечить оптимізацію всіх технічних та економічних показників доставки.

Ключові слова: логістичний посередник, логістичний ланцюг, зовнішньоторговельна операція, стратегічне управління, доставка товару, транспортний процес.

**DEVELOPMENT OF ALTERNATIVE INTERNATIONAL
SHIPMENT PROJECTS INVOLVING LOGISTICS
INTERMEDIARIES IN WARTIME**

Ie.M. Lebid¹, N.O. Luzhanska², I.H. Lebid³

¹PhD, Associate Professor, Associate Professor
of the Department of Transport Law and Logistics,
National Transport University, Kyiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-1794-8060

²PhD, Associate Professor, Associate Professor
of the Department of International Transportation and Customs Control,
National Transport University, Kyiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-1271-8728

³PhD, Associate Professor, Professor
of the Department of International Transportation and Customs Control,
National Transport University, Kyiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-0707-4179

Summary

Introduction. Since the beginning of the war in Ukraine, entities in the transport service market have had an urgent need to find alternative international shipment solutions. Special attention needs to be paid to the development of transportation routes for cargo that used to be transported to the ports and airports of Ukraine before the war. Purpose. Nowadays the main task for logistics intermediaries is the formation of logistics chain projects taking into account possible foreign trade risks and ensuring the minimization of cost and delivery time. At the same time, enterprise specialists must take into account technical, technological and organizational limitations that infrastructure facilities might be subject to as well as how this will affect their capacity. Results. The authors develop projects for the supply of goods from China to Ukraine involving the services of seaports located in Poland, Latvia and Romania. For each of the routes, we determine the cost and time of delivery and consider the process of cargo transportation from the specified ports to the customer by road. The research also makes recommendations for the application of managerial decision-making strategies depending on the customer's needs. Conclusions. The development of alternative international shipment solutions currently presents quite a topical issue for both the Ukrainian market and foreign contractors. The priority lies in the planning of the logistics chain and all stages of transport process organization. In order to reduce the transportation expenditure account in the cost of selling goods to the final consumer, some measures are in place ensuring the optimization of all technical and economic indicators of delivery.

Key words: *logistics intermediary, logistics chain, foreign trade operation, strategic management, delivery of goods, transport process.*

Вступ. З початком війни в Україні підприємства, що здійснюють зовнішньоторговельні операції або надають супутні послуги, зазнали значних збитків та були змушені відновлювати господарську діяльність в умовах воєнного стану.

Обмеження, що виникли, стосуються як відсутності доступу до окремих об'єктів інфраструктури та їх ресурсів, так і безпеки персоналу підприємств і їх діяльності під час повномасштабного вторгнення. Проте, зростаюча потреба як в експорті товарів, так і імпорту в Україну стала поштовхом до розробки та впровадження проєктів альтернативних шляхів доставки. Актуальність даних впроваджень і на сьогоднішній день є вагомою для виробників товарів, торговельних, транспортних, логістичних та митно-брокерських підприємств. Оскільки, результат їх підприємницької діяльності, як платників податків, забезпечить наповнення бюджету України. Тому, для відновлення зовнішньоторговельних операцій необхідним є стратегічне планування, що містить багаторівневу, складну діяльність і велику кількість управлінських рішень.

Постановка проблеми. Зовнішньоекономічна діяльність (ЗЕД) є сферою економічної політики держави, основою якої є виробництво продукції та послуг, призначених для іноземних ринків. Сьогодні важливим є питання розширення зовнішньоекономічних зв'язків держави. Таке розширення залежить від сталого розвитку ЗЕД окремих суб'єктів господарювання держави. Тобто, рушійною силою є підприємства, що здійснюють ЗЕД та нарощують конкурентоспроможність держави. А це, у свою чергу, сприяє поступовому та безперервному економічному зростанню держави.

Розглянемо обсяги зовнішньої торгівлі товарами України за останні 5 років (рис. 1).

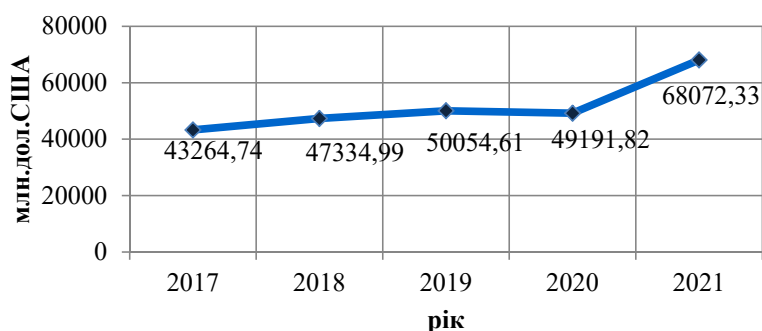


Рис. 1. Обсяги зовнішньої торгівлі товарами України у напрямку експорту за 2017–2021 рр.

Основною причиною збільшення товарообігу України протягом 9 місяців 2021 року на 35,3% проти аналогічного періоду 2020 року є зростання світових цін на провідні товарні позиції українського експорту. При цьому зростання по експорту (на 38,2%) було більшим за зростання по імпорту (на 32,6%).

Основними партнерами України, в які здійснювався експорт у 2021 році, стали Китай (8003,56 млн. дол. США), Польща (5227,41 млн дол. США), Туреччина (4142,63 млн дол. США) та Італія (3469,27 млн дол. США) (рис. 2).

Основними категоріями товарів, що були експортовані у 2021 році, стали недорогоцінні метали та вироби з них (всього 15991 млн дол. США), продукти рослинного походження (всього 15538,03 млн дол. США) та мінеральні продукти (8414,37 млн дол. США).

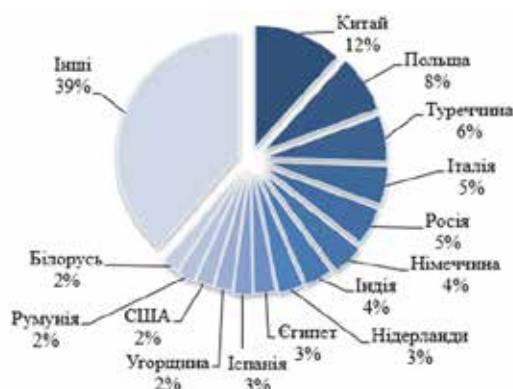


Рис. 2. Топ-країни, у які було експортовано продукцію у 2021 р.

Розглянемо товарну структуру експорту за 2021 рік (рис. 3).

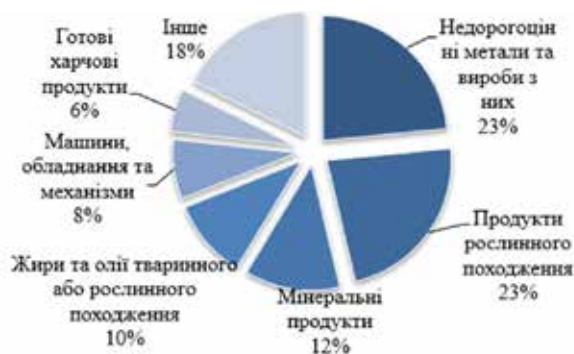


Рис. 3. Товарна структура експорту України за 2021 рік [10]

Попри збільшення цінних показників для експорту товару, простежується тенденція і до збільшення цінних показників на імпорт товару. Обсяги імпортованої продукції наведено на рис. 4.

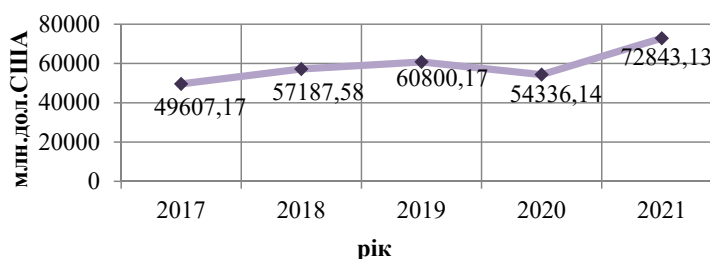


Рис. 4. Обсяги імпорту товарів в Україну за 2017–2021 рр. [10]

Розглянемо також топ-країни, звідки було найбільш імпортовано продукції у 2021 році. Ними стали: Китай (10981,71 млн дол. США), Німеччина (6284,37 млн дол. США), Росія (6083,49 млн дол. США) та Польща (4962,5 млн дол. США) (рис. 5).

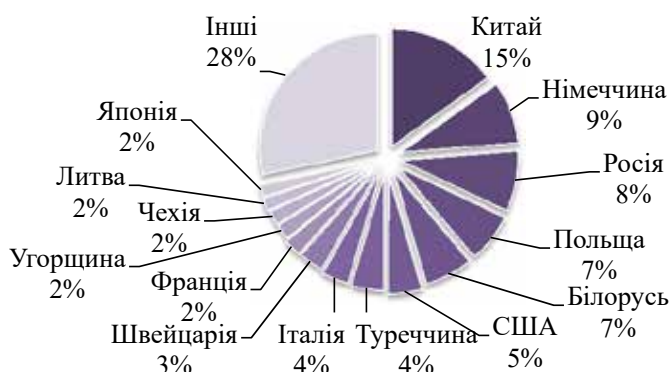


Рис. 5. Основні країни-експортери продукції в Україну у 2021 році [10]

Основними категоріями товарів, що були імпортовані у 2021 році стали мінеральні продукти (всього 14968,77 млн дол. США), машини, обладнання та механізми (всього 14205,99 млн дол. США) та засоби наземного транспорту, літальні апарати, плавучі засоби (7572,38 млн дол. США) (рис. 6).

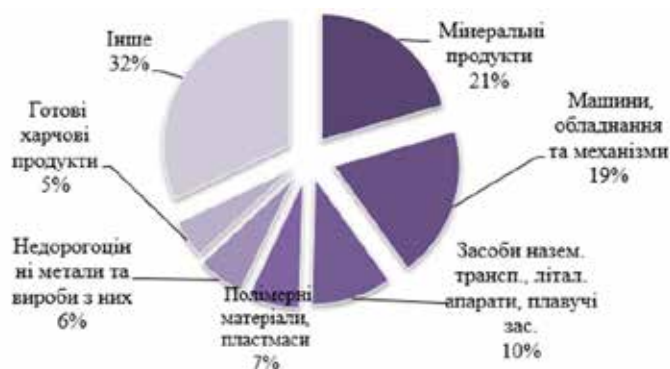


Рис. 6. Товарна структура імпорту України за 2021 рік

Розглянемо обсяги перевезень різними видами транспорту за останні чотири роки (рис. 7).

У таблиці 1 наведено детальні обсяги перевезення для кожного виду транспорту.

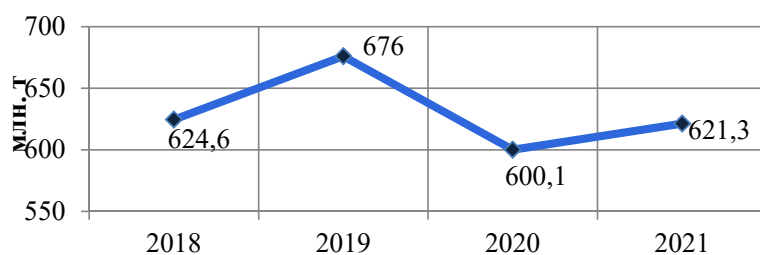


Рис. 7. Обсяги перевезення різними видами транспорту за 2018–2021 рр.

Таблиця 1

Обсяги перевезення вантажів різними видами транспорту

Вид т-ту \ Рік	2018	2019	2020	2021
Залізничний	322,3	312,9	305,5	314,3
Автомобільний	187,2	244,2	191,4	224
Водний	5,6	6,1	5,6	5,3
Трубопровідний	109,4	112,7	97,5	77,6
Авіаційний	0,1	0,1	0,1	0,1

Як можна побачити з таблиці, основну частку перевезень вантажів займають перевезення залізничним транспортом. Наступним за кількістю перевезених вантажів є автомобільний транспорт. Розглянемо структуру вантажів, що були перевезені цими видами транспорту за 2021 рік (рис. 8–9).

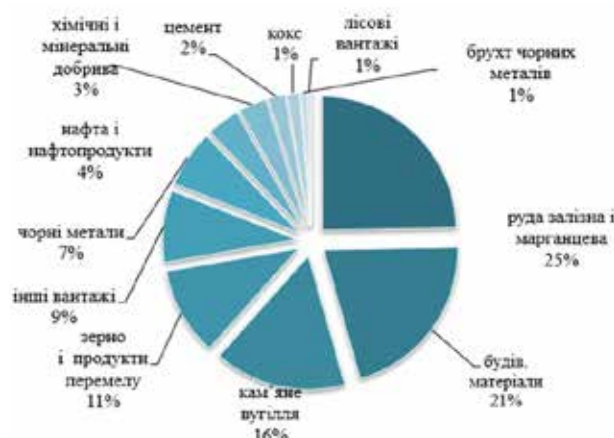


Рис. 8. Структура перевезених вантажів залізничним транспортом у 2021 році [10]

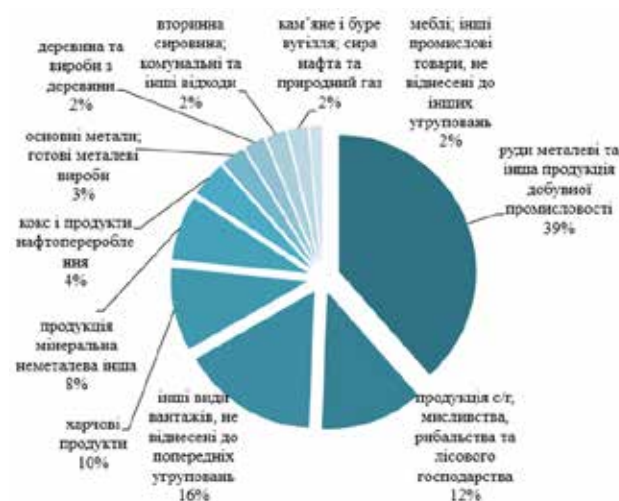


Рис. 9. Структура перевезених вантажів автомобільним транспортом у 2021 році

Таким чином найбільшу частку становлять наступні категорії вантажів: руда залізна і марганцева (77,6 млн т), будівельні матеріали (65,7 млн т) та кам'яне вугілля (50,1 млн т).

При перевезенні автомобільним транспортом, найбільшу частку займають такі групи вантажів: руди металеві, продукція сільського господарства, рибальства та мисливства, харчові продукти.

Як свідчать статистичні дані про торгівлю України з іноземними партнерами у довоєнний період, то відсутність постачання такого значного обсягу товарів може спричинити значний дефіцит в країнах світу. Тому, пошуки альтернативних шляхів постачання є досить актуальними і потребують розробки проєктів з усунення кризового стану українських експортерів та імпортерів, а також підприємств транспортно-логістичного комплексу з метою відновлення зовнішньоторговельних операцій.

Формулювання цілей статті. Діяльність логістичних посередників зосереджена на формуванні взаємодії між усіма учасниками логістичного ланцюга. Основна концепція доставки товару полягає у мінімізації показників вартості та тривалості виконання як основних, так і допоміжних процесів.

Метою статті є вивчення послідовності дій логістичних посередників при розробці проєктів доставки товарів у міжнародному сполученні в умовах війни. Запропоновані рішення повинні містити рекомендації для суб'єктів ринку транспортних послуг при плануванні їх діяльності в умовах ризику. В результаті дослідження сформульовано показники ефективності доставки товару, що забезпечують оптимальні умови співпраці між усіма ланками логістичного ланцюга.

Виклад основного матеріалу. На сьогоднішній день, основними портами, в які прибувають вантажі з Азії, Америки та інших країн, розділених океаном, є порти сусідніх країн, такі як: м. Гданськ (Польща), м. Бургас (Болгарія), м. Констанца (Румунія) та м. Рига (Латвія). На початку війни, контейнери, що йшли до портів України, були переадресовані до портів вищезазначених сусідніх країн. Це призвело до кризи у транспортній системі, адже на той час більшість портів не готові були прийняти додаткову значну кількість вантажів. Прослідковувалась тенденція до зросту ставок на перевалку та доставку вантажу, а всі припортові склади були вщент забиті вантажами. При виникненні нових ризиків, актуальною стала проблема вибору способу доставки вантажу та, особливо, надійного логістичного посередника, який зможе надати відповідні послуги у найвищій якості.

Логістичними посередниками здійснюється організація та планування процесів, пов'язаних з доставкою товарів. В залежності від вимог замовника може бути застосована різна процедура розробки проєкту поставки товару. Основними задачами у діяльності посередницьких організацій є: вибір виду транспорту, розробка маршруту руху, вибір рухомого складу, підготовка товару до перевезення, документальне забезпечення на всіх етапах доставки, контроль за якістю сервісу та дотриманням регламенту виконання робіт.

Слід врахувати, що, якщо перевезення буде здійснюватися різними видами транспорту, то організатором транспортного процесу може виступати як один, так і декілька логістичних посередників. Це залежить від наявності в штаті

підприємства фахівців відповідної кваліфікації. Розглянемо етапи організації перевезення автомобільним транспортом та дії, що виконуються логістичними посередниками на кожному з кроків.

Етап 1. Планування робіт при організації перевезення автомобільним транспортом:

1.1. Прийняття та розгляд звернення замовника (електронна пошта, факс, повідомлення, телефонний дзвінок). Отримання та обробка інформації про: реквізити замовника; місце завантаження та розвантаження (маршрут); найменування товарів; транспортні та кількісні характеристики товару (габарити, дата готовності вантажу, необхідні дозволи для організації перевезення); спеціальні умови перевезення.

1.2. Планування маршруту: формування плану перевезення на основі вимог замовника та пропозицій транспортних підприємств; отримання комерційної пропозиції мінімум від 3 перевізників (вартість, дати, умови).

1.3. Проведення оцінки перевізників за встановленими критеріями: підбір перевізника, що відповідає вимогам замовника стосовно напрямку перевезення, фізико-хімічних властивостей товару, партії товару, термінів доставки, наявності вільного рухомого складу; складання калькуляції вартості перевезення.

1.4. Формування комерційної пропозиції замовнику: проведення узгодження вартості та умов перевезення з директором з продажів, а потім із замовником.

Етап 2. Прийняття заявки від замовника.

2.1. Отримання офіційного замовлення на виконання послуг перевезення чи транспортно-експедиторського обслуговування.

2.2. Укладання договору на перевезення чи транспортно-експедиторське обслуговування з замовником.

Етап 3. Розміщення заявки на перевезення:

3.1. Укладання договору на перевезення.

3.2. Розміщення заявки на перевезення у перевізника.

Етап 4. Контроль за виконанням умов перевезення.

4.1. Оформлення транспортних документів. У разі міжнародних перевезень – інформування відповідальної особи та організація отримання документів при:

– поставці в Україну: попереднє повідомлення / попередня декларація, при необхідності – відкриття TIR Carnet;

– відправці з України: документи, що передбачені тарифним та нетарифним регулюванням.

4.2. Проведення контролю завантаження: забезпечення відповідності термінів, кількості пакувальних місць, за необхідності – організація проведення фотографування.

4.3. Контролювання місцезнаходження автотранспорту з вантажем по маршруту перевезення.

4.4. Проведення контролю проходження митного оформлення вантажів: отримання номера попереднього повідомлення / попередньої декларації для перетину кордону; організація своєчасного заїзду на митний термінал; обмін документами (CMR, рахунок-фактура, товаросупровідні документи) між водієм

та агентом з митного оформлення; при необхідності – забезпечення догляду вантажу; отримання підтвердження завершення митного оформлення (номер митної декларації).

4.5. Проведення контролю вивантаження товарів: інформування замовника про завершення митного оформлення, дані про водія та терміни прибуття на вивантаження; контроль отримання відмітки у транспортних (супровідних) документах про прийняття вантажу замовником.

Етап 5. Обмін документацією з замовником та перевізником за результатами робіт:

5.1. Обмін документами з перевізником: отримання транспортних документів з усіма відмітками про завершення перевезення і завершення митного оформлення; отримання рахунків на сплату послуг з перевезення; відправлення рахунків в бухгалтерію на оплату.

5.2. Організація формування рахунку замовнику: надання в бухгалтерію фінансового звіту по перевезенню.

5.3. Обмін документами з замовником: оформлення рахунків та актів виконаних робіт та передача їх замовнику; контроль отримання оплати.

Етап 6. Аналіз виконання процесу:

6.1. Закриття заявки.

6.2. Формування фінального пакету документів.

6.3. Врегулювання претензійних вимог замовника (за наявності).

За потреби виконання змішаного перевезення до порту товар транспортується автомобільним транспортом, а доставка морським транспортом здійснюється за окремою процедурою, з урахуванням усіх вимог, що висувуються до перевезення цим видом транспорту. Відповідно, логістичний посередник розробляє структуру робіт при організації перевезення морським транспортом та експедирування в порту.

Етап 1. Планування робіт:

1.1. Приймання та розгляд звернення замовника. Отримання інформації про: реквізити замовника; місце завантаження та розвантаження (маршрут); найменування товарів; транспортувальні та кількісні характеристики товару (габарити, дата готовності вантажу, необхідні дозволи для організації перевезення); спеціальні умови перевезення.

1.2. Планування маршруту: формування плану перевезення на основі вимог Замовника та пропозицій транспортних суднохідних ліній; отримання комерційної пропозиції мінімум від 3 ліній (вартість, розклад руху, умови).

1.3. Проведення оцінки та вибору перевізників: проведення оцінки пропозиції перевізників за наступними критеріями (наявність ліній курсування суден на необхідному маршруті доставки вантажу; необхідна кількість місць на судах; необхідні терміни доставки; можливість перевезення небезпечних чи специфічних вантажів); визначення з перевізником під виконання звернення замовника; складання калькуляції вартості перевезення.

1.4. Формування комерційної пропозиції замовнику: проведення узгодження вартості та умов перевезення з директором з продажів, а потім із Замовником;

Етап 2. Прийняття заявок від замовників:

2.1. Отримання офіційного замовлення на виконання послуг перевезення чи транспортно-експедиторського обслуговування: реєстрація заявки за встановленою формою.

2.2. Укладання договору на перевезення чи транспортно-експедиторське обслуговування з замовником.

Етап 3. Розміщення заявки на перевезення:

3.1. Укладання договору на перевезення.

3.2. Розміщення заявки (букінгу) у судноплавної лінії.

Етап 4. Контроль виконання умов перевезення:

4.1. Оформлення транспортних документів: випуск коносамент, організація страхування, тощо.

4.2. Проведення контролю завантаження: забезпечення відповідності термінів, кількості пакувальних місць, збереженість вантажу.

4.3. Контролювання місцезнаходження судна з контейнером за маршрутом перевезення.

4.4. Оформлення попередніх рахунків замовникам за перевезення: передача в бухгалтерію фінансового розрахунку за перевезення.

4.5. Інформування митного поста про терміни прибуття вантажу: відправлення електронних документів по перевезенню: коносамент, зовнішньоекономічний договір (контракт), рахунок-фактура, сертифікати та інші супровідні документи.

4.6. Проведення контролю проходження митного оформлення вантажів: отримання попередньої декларації, документів для внутрішньопортового експедирування, товаротранспортних накладних, угоди, звіту порту.

4.7. Проведення контролю проходження митної очистки: фіксування факту прибуття вантажу на термінал.

4.8. Організація перевезення наступним видом транспорту (за необхідності).

4.9. Проведення контролю вивантаження товарів: інформування замовника про завершення митного оформлення, дані про перевізника та терміни прибуття на вивантаження; контроль отримання відмітки у транспортних (супровідних) документах про прийняття вантажу замовником.

Етап 5. Обмін документацією з замовником та перевізником за результатами робіт:

5.1. Обмін документами з перевізником: отримання транспортних документів з усіма відмітками про завершення перевезення і завершення митного оформлення; отримання рахунків про сплату послуг з перевезення та передача їх в бухгалтерію на оплату.

5.2. Організація формування рахунку замовнику: надання в бухгалтерію фінансового звіту по перевезенню.

5.3. Обмін документами з замовником: оформлення рахунків та актів виконаних робіт; передача їх замовнику; контроль отримання оплати.

Етап 6. Аналіз виконання процесу:

6.1. Закриття заявки: формування фінального пакету документів.

6.2. Врегулювання невідповідностей в процесі надання послуги. Проведення дій по узгодженню з замовником: відхилень термінів доставки по графіку

маршруту; виправленню документів, що супроводжують перевезення; вирішенню інших незначних спірних ситуацій в процесі надання послуги.

6.3. Врегулювання претензійних вимог замовника (за наявності).

Як бачимо, задача логістичних посередників полягає у покроковій реалізації проекту постачання товару з урахуванням специфіки вимог Замовника, безпекової ситуації та дотримання термінів доставки.

Для прикладу проаналізуємо можливі варіанти доставки вантажів з порту м. Шанхай (Китай) до основних альтернативних портів, з яких в подальшому здійсниться їх перевезення автомобільним транспортом до м. Київ (рис. 10).

Розглянемо вартість та тривалість доставки вантажу у таблиці 2.

Таким чином, за досліджуваними показниками, оптимальним варіантом є доставка до порту Гданськ, проте застосування послуг інших портів розглядається логістичними посередниками як альтернатива.

З метою дослідження процесу доставки товару автомобільним транспортом від вищевказаних портів, розглянемо характеристики цих маршрутів.

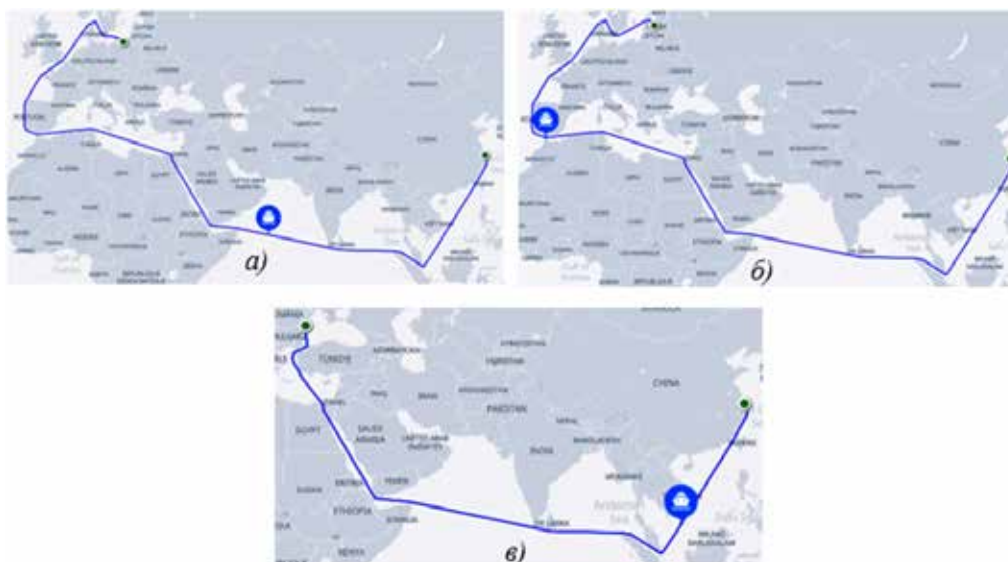


Рис. 10. Альтернативні морські маршрути доставки вантажу:
а) м. Шанхай, Китай – м. Гданськ, Польща; б) м. Шанхай, Китай – м. Рига, Латвія; в) м. Шанхай, Китай – м. Констанца, Румунія

Таблиця 2

**Характеристика перевезення контейнерів з порту Шанхай до
альтернативних портів**

Маршрут	Вартість доставки, Євро	Тривалість доставки, днів
Шанхай, Китай – Гданськ, Польща	1342	34
Шанхай, Китай – Рига, Латвія	1560	47
Шанхай, Китай – Констанца, Румунія	2420	41

Наведемо карту руху автотранспортного засобу у сполученні м. Гданськ (Польща) – м. Київ (Україна) (рис. 11).

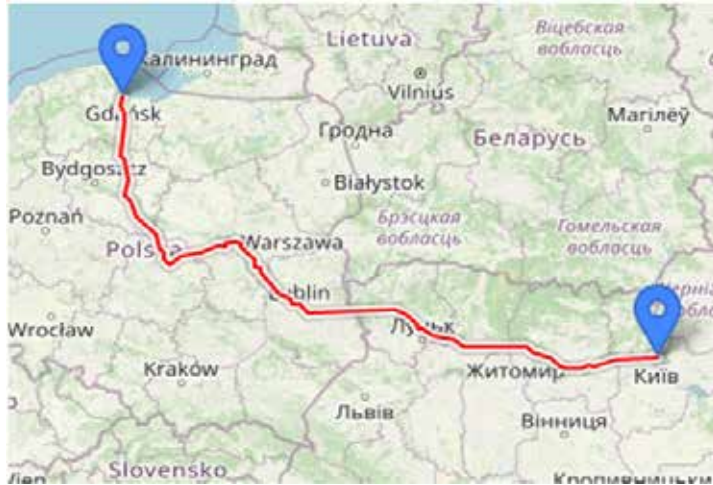


Рис. 11. Карта руху автотранспортного засобу за маршрутом м. Гданськ (Польща) – м. Київ (Україна)

Маршрут прокладено, надаючи пріоритет дорогам класу Е, загальною протяжністю 1206 км.

Аналогічним чином плануємо маршрут у сполученні м. Рига (Латвія) – м. Київ (Україна) (рис. 12).

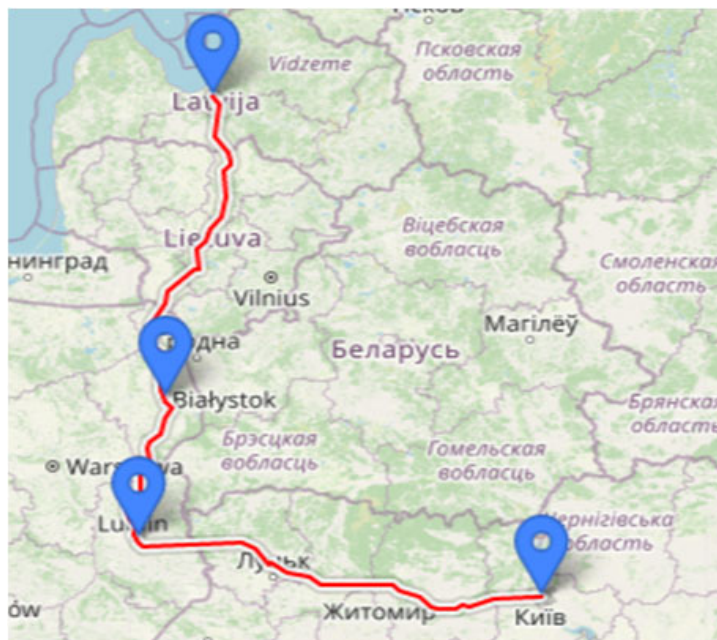


Рис. 12. Карта руху транспортного засобу за маршрутом м. Рига (Латвія) – м. Київ (Україна)

Загальна протяжність маршруту – 1374 км.

Маршрут перевезення вантажу м. Констанца (Румунія) – м. Київ (Україна) представлений наступним чином (рис. 13):

Загальна протяжність маршруту – 910 км.

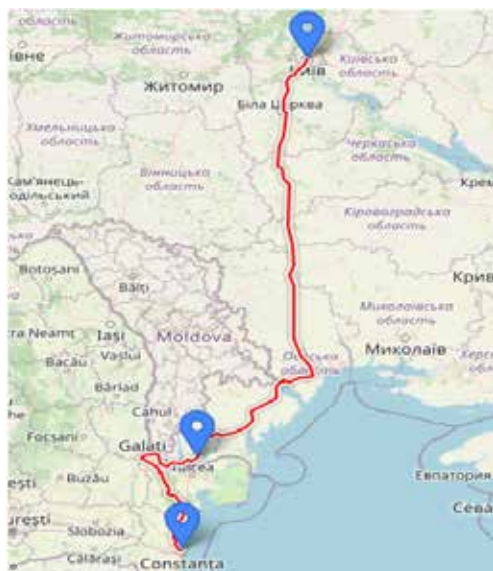


Рис. 13. Карта руху транспортного засобу за маршрутом м. Констанца (Румунія) – м. Київ (Україна)

За результатами дослідження трьох основних маршрутів доставки товару з Китаю до України можемо представити наступні підсумкові розрахунки за показниками ефективності доставки, що наведено у таблиці 3.

Таким чином, в якості альтернативного способу доставки вантажу, оптимально обирати варіант доставки через порт Гданськ (Польща). Проте, можливість виконання доставки товару через інші досліджувані порти не виключається в зв'язку з обмеженою пропускнуою здатністю порту Гданськ.

Таблиця 3

Показники ефективності доставки товару

Послуга / Маршрут	Шанхай – Гданськ – Київ	Шанхай – Рига – Київ	Шанхай – Констанца – Київ	Відповідальна організація
Фрахт, євро	1342	1560	2420	Морська лінія
Збори у порту призначення, євро	~300	~300	~300	Портовий експедитор
Комплекс послуг з обробки контейнеру, євро	610	650	930	Перевізник/Склад
Перевезення вантажу, євро	2384,76	2693,44	2086,37	Перевізник
Загальний час транзиту, днів	38	52	45	
Всього, євро	4636,76	5203,44	5736,37	

Висновки. В умовах воєнного стану на доставку товарів у міжнародному сполученні значно впливає обмеження щодо виконання перевезень із залученням морського транспорту. Перед логістичними підприємствами постають питання організації транспортного процесу із застосуванням альтернативних маршрутів. Значно підвищилась складність формування логістичних ланцюгів, зросла вартість та тривалість доставки, а також здійснюється детальна оцінка зовнішньоторговельних ризиків з боку контрагентів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Державна митна служба України. URL: <https://customs.gov.ua/>
2. Державна служба статистики України: веб. сайт. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 17.01.2023).
3. Reza Zanjirani Farahani, Shabnam Rezapour, Laleh Kardar. Logistics operations and management: concepts and models. Waltham, MA : Elsevier, 2011. 469 p. URL: https://www.academia.edu/11637506/Logistics_and_Operation_Management_PDF.
4. Andrzej S. Logistics and Supply Chain Management. 2012. 393 p. https://www.researchgate.net/publication/297369572_Logistics_and_Supply_Chain_Management
5. Luzhanska N. Impact of the Cargo Customs Complex Efficiency on the Supply Chain Reliability. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*. 2020. № 1 (5). P. 96-102. DOI: <http://dx.doi.org/10.14254/jsdtl.2020.5-1.9>
6. Luzhanska N. Influence of the client-oriented approach on logistics chain formation involving a freight customs complex. *Scientific Letters of Academic Society of Michal Baludansky*. 2020. № 8 (2-2020). P. 8&14.
7. Taha, Hamdy A. Operations research: an introduction. Upper Saddle River (New Jersey). 2017. 848 p.
8. Korczak J. Logistyka. Systemy. Modelowanie. Informatyzacja. Warszawa : BEL Studio Sp. z o.o., 2010. 316 s.
9. Dai B., Nu Y., Xie X., Li J. Interactions of traceability and reliability optimization in a competitive supply chain with product recall. *European Journal of Operational Research*. 2021. № 290 (1). P. 116–131. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.08.003
10. Wang B., Zhang H., Yuan M., Guo Z., Liang Y. Sustainable refined products supply chain: A reliability assessment for demand-side management in primary distribution processes. *Energy Science & Engineering*. 2019. № 8 (4). P. 1029–1049. DOI: 10.1002/ese3.566
11. Artsiomchyk Y., Zhivitskaya H. Improving the supply chain efficiency based on reliability analysis. *International Conference on Information and Digital Technologies*. 2015. P. 16–21. DOI: 10.1109/DT.2015.7222944.

REFERENCES

1. State Customs Service of Ukraine. Available at: <https://customs.gov.ua/>
2. State Statistics Service of Ukraine: Available at: <http://www.ukrstat.gov.ua/>
3. Reza Zanjirani Farahani, Shabnam Rezapour, Laleh Kardar. Logistics operations and management: concepts and models. Waltham, MA : Elsevier, 2011. 469 p. URL: https://www.academia.edu/11637506/Logistics_and_Operation_Management_PDF
4. Andrzej S. Logistics and Supply Chain Management. 2012. 393 p. https://www.researchgate.net/publication/297369572_Logistics_and_Supply_Chain_Management
5. Luzhanska N. Impact of the Cargo Customs Complex Efficiency on the Supply Chain Reliability. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*. 2020. № 1 (5). P. 96-102. DOI: <http://dx.doi.org/10.14254/jsdtl.2020.5-1.9>
6. Luzhanska N. Influence of the client-oriented approach on logistics chain formation involving a freight customs complex. *Scientific Letters of Academic Society of Michal Baludansky*. 2020. № 8 (2-2020). P. 8–14.
7. Taha, Hamdy A. Operations research: an introduction. Upper Saddle River (New Jersey). 2017. 848 p.
8. Korczak J. Logistyka. Systemy. Modelowanie. Informatyzacja. Warszawa : BEL Studio Sp. z o.o., 2010. 316 s.
9. Dai B., Nu Y., Xie X., Li J. Interactions of traceability and reliability optimization in a competitive supply chain with product recall. *European Journal of Operational Research*. 2021. № 290 (1). P. 116–131. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.08.003
10. Wang B., Zhang H., Yuan M., Guo Z., Liang Y. Sustainable refined products supply chain: A reliability assessment for demand-side management in primary distribution processes. *Energy Science & Engineering*. 2019. № 8 (4). P. 1029–1049. DOI: 10.1002/ese3.566
11. Artsiomchyk Y., Zhivitskaya H. Improving the supply chain efficiency based on reliability analysis. *International Conference on Information and Digital Technologies*. 2015. P. 16–21. DOI: 10.1109/DT.2015.7222944

**FOCUSED RESEARCH ON TECHNOLOGICAL INNOVATIONS
IN SHIPPING INDUSTRY: REVIEW AND PROSPECTS**

**O.M. Melnyk¹, O.V. Shcherbina², Iu.V. Mykhailova³,
T.S. Obnyavko⁴, T.O. Korobko⁵**

¹PhD (Eng.), Associate Professor at the Department of Navigation and Maritime Safety,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-9228-8459

²PhD (Eng.), Associate Professor at the Department of Fleet Operation and Marine
Transportation Technology,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-4714-0399

³PhD (Econ.), Associate Professor at the Department of Fleet Operation and Maritime
Transportation Technology,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-4882-7803

⁴PhD (Econ.), Associate Professor at the Department of Logistics,
Military Academy, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-2192-6377

⁵Associate Professor of the Department at Ukrainian Studies, Historical,
Legal and Language Disciplines,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID: 0009-0000-1588-2163

Summary

Introduction. *Maritime transportation has always been an important component of global trade and commerce. The emergence and development of new technologies, as well as growing demands for efficiency and sustainability, have led to a period of transformation in the industry. The introduction of new technologies is no longer a choice, but a necessity for maritime transport enterprises to remain competitive and meet the requirements of a rapidly changing market. The advantages of using innovative technologies in maritime transport are numerous, allowing for better control of the ship and her propulsion system, which in turn reduces the risks of harmful impact on the ecosystem. The latest technologies can significantly improve the efficiency of maritime operations, which includes optimizing shipping routes and reducing fuel consumption. Shipping companies are able to use improvements in both hardware and software to optimize their fleet monitoring and management operations through satellite data and shipboard sensors that connect equipment, which increases safety of navigation, helps to address environmental issues in shipping and improves the operational efficiency of transport operations. Purpose. This article offers an overview of the background of technological innovation, the current state of the maritime transportation industry, and the challenges it faces in adopting new technologies. It also looks at some of the recent technological advances and their potential impact on the industry and the prescriptive opportunities that maritime*

transport has to offer. Results. The process of introducing the latest technologies is a way to overcome regulatory barriers and high investment costs, modern ways for transport companies to navigate the complex landscape in order to realize the full potential benefits of such technologies and a constant search for a balance between improving operational efficiency and solving environmental problems. Conclusion. In assessing the future of such technologies, it should be noted with confidence that the introduction of new technologies has the potential to fundamentally change maritime transport, so adopting these changes and utilizing them contributes to a more sustainable, efficient and competitive industry.

Key words: Maritime transportation, freight and passenger carriage, innovative technologies, shipping technology, autonomous ships, sustainable development, safety of shipping, ship navigation.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ІННОВАЦІЙ В ГАЛУЗІ СУДНОПЛАВСТВА: ОГЛЯД ТА ПЕРСПЕКТИВИ

О.М. Мельник¹, О.В. Щербина², Ю.В. Михайлова³,
Т.С. Обнявко⁴, Т.О. Коробко⁵

¹к.т.н., доцент кафедри судноводіння і морської безпеки,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-9228-8459

²к.т.н., доцент кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-4714-0399

³к.е.н., доцент кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-4882-7803

⁴к.е.н., доцент кафедри тилового забезпечення
Військова академія, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-2192-6377

⁵доцент кафедри українознавства, історико-правових та мовних дисципліни
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID: 0009-0000-1588-2163

Анотація

Вступ. Морський транспорт завжди був важливою складовою світової торгівлі та комерції. Поява і розвиток нових технологій, а також зростаючі вимоги до ефективності та сталого розвитку спричинили період трансформації галузі. Впровадження нових технологій більше не є вибором, а необхідністю для підприємств морського транспорту, щоб залишатися конкурентоспроможними і відповідати вимогам ринку, що швидко змінюється. Переваги використання інноваційних технологій на морському транспорті численні, вони дозволяють якісніше контролювати судно і силові установки, що в свою чергу знижує ризики шкідливого впливу на екосистему. Новітні технології здатні значно підвищити ефективність морських операцій, що передбачає оптимізацію судноплавних маршрутів і скорочення споживання палива. Судноплавні компанії в змозі використовувати вдосконалення як апаратного, так і програмного

забезпечення для оптимізації своїх операцій з моніторингу та управління роботою власного флоту завдяки даним з супутників і датчикам встановленим на судні, які з'єднують обладнання, що підвищує безпеку мореплавства що сприяє вирішенню екологічних проблем судноплавства і підвищує операційну ефективність транспортних операцій. **Мета.** Ця стаття пропонує огляд передумов технологічних інновацій, аналіз поточного стану галузі морського транспорту та викликів, з якими вона стикається при впровадженні нових технологій. Також розглядаються деякі з останніх технологічних досягнень та їхній потенційний вплив на розвиток галузі, зокрема, на можливості, відкриті перед морським транспортом. **Результати.** Процес впровадження новітніх технологій це шлях подолання регуляторних бар'єрів та високої вартості інвестицій, сучасні способи орієнтації транспортних компаній в складному ландшафті, з метою реалізації повною мірою потенційних переваг таких технологій та постійний пошук балансу між підвищенням операційної ефективності та вирішенням екологічних проблем. **Висновки.** Оцінюючи майбутнє таких технологій, необхідно з упевненістю зазначити, що впровадження новітніх розробок має потенціал докорінно змінити сферу морських перевезень, тож прийняття цих змін та їх використання сприятиме створенню більш стійкої, ефективною та конкурентоспроможною морської індустрії.

Ключові слова: морський транспорт, вантажні та пасажирські перевезення, інноваційні технології, технології транспортування, автономні судна, сталий розвиток, безпека судноплавства, процес судноводіння.

Introduction. New technologies in the maritime industry include autonomous ships, marine robotics, new materials, blockchain, IoT, advanced communications, artificial intelligence, virtual reality and augmented reality. These technologies are being used to improve navigation, fuel efficiency and safety. The maritime industry has seen the introduction of new ship classes, including autonomous ships and digital twins. These technologies are expected to revolutionize the industry in the coming years.

The introduction of innovations and their development in the marine transport industry is the subject of the works of many scientists. Thus an overview of the main technological trends transforming the maritime industry is devoted to the work [1]. In [2] researched exploring technology in maritime sector and its role in coping with the COVID-19 pandemic. Smart ship technologies for the maritime industry studied in [3]. Wärtsilä encyclopedia of ship technology aimed at strengthening the growth and ensuring the future of commercial shipping and adapting the industry to the new realities in [4]. The rapid development of information technology, which the shipping industry is experiencing as an important period of change in the development of the transition to intelligence and wisdom, is explored in [5]. The importance of emerging technologies to the increasing of corporate sustainability in shipping companies researched in [6]. Innovation through collaboration: application in the maritime industry, future in maritime education and training and priority areas of innovations in maritime industry examined in [7–9]. Studies in national governance and emerging technologies given in [10]. Rights of salvage and innovation in the united states admiralty courts explored in [11]. Navigational safety assessment and autonomous ship concept researched in [12, 13].

Thus, a review of the literature on the topic of research indicates that the subject is very relevant, and its impact on the development of the shipping industry is difficult to overestimate.

Materials and methods. The maritime transport industry is constantly evolving, and new technologies are being developed to improve efficiency, safety, and sustainability. Prerequisites for the introduction of new technologies in the maritime transport industry are primarily in the development of infrastructure. New technologies often require changes in the infrastructure of ports and terminals. For example, the installation of shore power systems to support electrification of vessels, or the deployment of autonomous mooring systems to accommodate autonomous ships. Maritime transport is a highly regulated industry, and new technologies must comply with international and national standards and regulations. Standards for cybersecurity, safety, and environmental protection are particularly important for new technologies in the maritime sector. New technologies often require high-speed and reliable connectivity to transmit data between ships, ports, and other stakeholders in the maritime transport supply chain. The availability of satellite communications and 5G networks can enable new technologies such as remote vessel monitoring and control. The successful implementation of new technologies requires a skilled workforce that can operate and maintain these technologies. Training programs and certification schemes are needed to ensure that seafarers, port workers, and other stakeholders have the necessary skills and knowledge to work with new technologies.

The adoption of new technologies requires significant investment from the maritime transport industry, including ship owners, ports, and logistics companies. Funding for research and development, pilot projects, and large-scale deployment is needed to accelerate the adoption of new technologies. The successful implementation of new technologies requires collaboration between different stakeholders in the maritime transport industry, including ship owners, ports, logistics companies, technology providers, and regulators. Collaboration can help to overcome barriers to adoption and accelerate the development of new technologies.

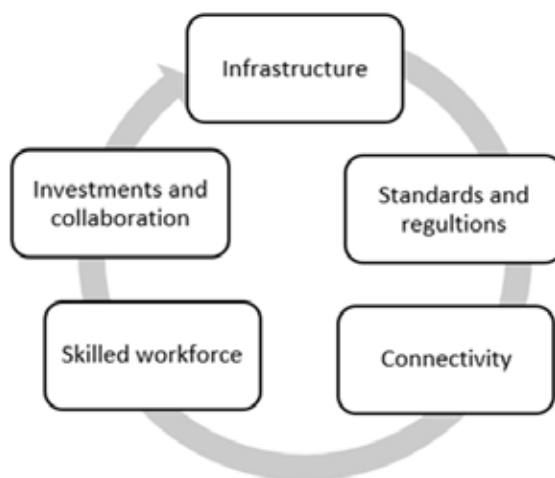


Fig. 1. Prerequisites for new technologies on the maritime transport

The maritime industry faces a number of challenges, including a shortage of workers, new environmental regulations, safety risks, and rising costs. In addition, the industry faces a constant imbalance of supply and demand, environmental imperatives, and employment issues related to an aging workforce. In 2023 and beyond, people will remain the focus of the industry while introducing technology and solving environmental problems. Thus, the maritime industry is undergoing a technological revolution that is transforming the way shipping companies operate. Technology is setting up trends and challenges in maritime management, with smart fleet operation and autonomous vessels being some of the most promising areas of development. The International Council on Clean Transportation has identified several technologies and operational strategies aimed at increasing ship efficiency, including wind-assisted propulsion, air lubrication systems, and hull coatings. These technologies can help reduce CO₂ emissions from ships and make the marine sector safer for the environment.

Several factors contributed to the emergence of innovation in the maritime industry, including the following:

1. **Advancements in technology.** The maritime industry has been greatly impacted by technological advancements, which have led to the development of new and innovative tools, equipment, and software that have made shipping safer, more efficient, and more environmentally friendly. Examples of such technologies include automated cargo handling systems, satellite communication systems, and computerized navigation and tracking systems.

2. **Environmental concerns.** Growing concerns about the impact of shipping on the environment, such as pollution, greenhouse gas emissions, and oil spills, have led to the development of new technologies and practices that aim to reduce the environmental impact of the maritime industry. These innovations include hybrid and electric ships, ballast water treatment systems, and waste management technologies.

3. **Economic pressures.** Economic pressures have also played a role in driving innovation in the maritime industry. Shipping companies are constantly looking for ways to increase efficiency, reduce costs, and improve profitability, which has led to the development of new technologies and practices that can help them achieve these goals. Examples of such innovations include containerization, just-in-time inventory management, and the use of big data and analytics to optimize shipping routes and improve supply chain management.

4. **Globalization.** The increasing globalization of trade has created new opportunities and challenges for the maritime industry, which has led to the development of new technologies and practices that can help shipping companies better manage the complexities of global trade. These innovations include blockchain technology for secure and transparent supply chain management, digitalization of documentation and customs procedures, and the use of autonomous ships and drones for shipping and port operations. These and other factors have contributed to the birth of innovation in the maritime industry, helping to make shipping safer, more efficient, and more sustainable.

In recent years, there have been several innovations in the maritime transportation, aimed at making the process more efficient, cost-effective, and environmentally sustainable.

With the increasing use of digital technologies, the maritime industry has embraced digitalization in areas such as documentation, cargo tracking, and communication. This has led to greater transparency, improved efficiency, and reduced paperwork. Automation has been implemented in some ports and terminals, leading to faster turnaround times and reduced waiting times for vessels. Automated systems also enable real-time tracking of cargo and provide accurate data on container movements. The use of liquefied natural gas (LNG) as a fuel source for ships is gaining popularity due to its lower emissions of pollutants and reduced fuel costs. LNG-powered vessels are currently being used for both container and bulk cargo transport. Advanced analytics tools are being used to analyze data from shipping operations, which can help to optimize route planning, reduce fuel consumption, and improve overall efficiency. Blockchain technology is being used to improve the security, transparency, and efficiency of maritime supply chains. By creating a tamper-proof digital ledger, blockchain can help to reduce fraud, increase trust between parties, and improve supply chain visibility. The industry is exploring ways to reduce its environmental impact by using renewable energy sources, such as wind and solar power. Some vessels are also being retrofitted with scrubbers, which remove sulfur and other harmful emissions from exhaust gases. With all these innovations, the maritime shipping industry is transforming itself, making it more sustainable, more efficient and more cost-effective.

The COVID-19 pandemic has created unprecedented challenges for professionals across the maritime sector. However, technology can greatly improve the efficiency of maritime operations by creating a more sustainable and resilient shipping industry. Several international companies and port authorities from different parts of the world have recently signed a Memorandum of Understanding to ensure the interoperability of various global maritime technology platforms, which will require developing common data standards and Application Programming Interfaces (APIs).

The maritime industry is now looking to deploy more and more new generation vessels that could become a major component of the global freight transportation of the future. Since the 1960s, vessel tonnage has steadily increased due to economies of scale and fuel efficiency, with some container ships now boasting a capacity of 24,000 TEU. In port, these giant vessels are systematically connected to the shore power grid, reducing emissions



Fig. 2. 3D-printed screw of the new generation

while in port. This vision of the future will be achieved by modernizing the existing tonnage and building new vessels. The modernization and refitting of ships in service can be accomplished with lower material costs and fewer emissions thanks to additive manufacturing technology. This production method, which is already in use in various industries, can be used to manufacture anything from small machine parts to giant ship propellers.

More recently, a new generation 3D printed propeller, manufactured by the Naval Group in Paris in 2021, has been tested and certified. Naval Group produced this next-generation propeller with a 2.5-meter span, supported by five 200-kilogram blades, using a metal 3D printing process. Installed on the tripartite-class mine hunter, this propeller will now accompany the vessel on all of its operational missions. This screw is a technological achievement, as it is the largest metal 3D printed screw ever produced and the first screw to be made using additive manufacturing technology to equip a warship in service.

As part of its contribution to the maritime industry, the EU is funding projects to take advantage of new lightweight and high-performance materials that will be used in shipbuilding, for example to develop the first hollow propeller blade demonstrator. This innovative result was achieved using additive manufacturing (AM), a process in which 3D objects are created by adding layer after layer of material. Although additive manufacturing is increasingly present in industry, programming and designing complex parts such as propeller blades for a ship presents a significant challenge. The goal of the project is to produce propeller blades that increase the operational capabilities of the vessel.

Achieving high quality requires careful design, so modern technology has been involved in every step of the manufacturing and testing process. Drawing on technical expertise and innovative capabilities in 3D printing technology for the maritime industry, worked closely with Naval Europe Group's Inventor's Office throughout the process to define a production test and inspection plan for 3D printed parts, overseeing production steps and testing.

The AM process that researchers are using to improve ship propulsion is called wire arc additive manufacturing (WAAM). The process involves melting metal wire using an electric arc as a heat source. Once melted, the wire is extruded into beads that stick together to create a layer of metal. This is then repeated layer by layer to create a 3D metal part. WAAM is used to design large components – in this case, propellers up to 6 meters in diameter - those traditional manufacturing techniques are not capable of. This development will make it possible to produce propellers that are more complex in the future.

By improving ship design, from propellers to engines, the level of underwater noise emissions generated by ships will be significantly reduced, with less impact on wildlife mating, hunting and navigation. Excessive underwater noise levels can be particularly dangerous for marine life such as whales and dolphins, as it interferes with their communication, hunting, migration and echolocation. In addition to protecting the marine ecosystem, managing shipboard noise and vibration sources can improve crew well-being. An additional step to protect animal welfare will be a systematic approach by the human population to clean up the oceans from plastic waste. In

the future, the waters are planned to be patrolled and cleaned by small, safe electric vessels that will collect plastic and other waste to be sorted and recycled or disposed of responsibly. Through rig-to-shore programs, remnants of human presence, such as idle oil and gas platforms, will remain homes to corals and fish that can repopulate them. Under these programs, all hazardous materials are removed and the structure is left to nature.

There are several innovative technologies that are being developed or already in use in maritime passenger transportation. Here are some examples such as electric and hybrid ferries, which are becoming more common as a way to reduce emissions and noise pollution. For example, the Ampere, the world's first all-electric ferry, operates in Norway, and there are plans to build more electric ferries in other parts of the world. Autonomous ships are being developed to improve safety and reduce the cost of crewing. Several companies, including Rolls-Royce and Kongsberg, are working on autonomous ship projects. Virtual reality (VR) technology is being used to enhance the passenger experience on cruise ships. For example, Royal Caribbean has installed VR bungee trampolines and virtual reality headsets on its ships. Advanced propulsion systems, such as fuel cells, are being developed to reduce emissions and improve efficiency. For example, the MS "Color Hybrid", which operates in Norway, is the world's largest plug-in hybrid ship and uses both batteries and liquid natural gas as fuel. Air lubrication systems use a layer of air bubbles to reduce friction between the hull of a ship and the water, which can reduce fuel consumption and emissions. These systems are being tested on several ships, including the Viking Grace ferry.

Energy storage systems: Energy storage systems, such as batteries and flywheels, are being developed to improve the efficiency of ships and reduce emissions. For example, the Edda Ferd offshore vessel, which operates in Norway, is equipped with a hybrid battery system.

Overall, these innovative technologies have the potential to make maritime passenger transportation more sustainable, efficient, and enjoyable for passengers.

Smart ship technologies are also transforming the shipping industry. Autonomous technology for ships, IoT (internet of things), and data analytics represent some of the modern features that companies are adopting to improve shipping efficiency. By incorporating these features into their operations, shipping companies can improve time management and increase output from this domain. For example, implementing smart technology that accurately routes, deploys, and controls supply vessels would allow logistics divisions to be used in a more efficient manner.

Wärtsilä is one company leading innovation in ship technology. They believe that the marine industry must adapt to new technologies to remain competitive in today's market. Wärtsilä's recent acquisition of L-3 MSI brings a broad range of competencies within their portfolio. With 180 years of experience behind them as a technology leader in the marine industry's global transition to greater efficiency, lower operating costs, and enhanced environmental performance they are uniquely positioned to influence its future.

Some of the most promising maritime technologies include artificial intelligence, big data analytics, IoT on ships, and digital route optimization. Sensor technologies are also a popular choice for maritime-related industries. According to the experts, the top 10 trends in the maritime industry for 2023 include autonomous shipping, green shipping

and smart ports. ABB is one of the most innovative corporations in the maritime industry, offering a full range of digital solutions. Revolutionary technologies that are set to transform the maritime industry include blockchain, augmented reality and unmanned surface vehicles.

The future of maritime technology is bright: transforming technologies will lead to advances in ship design, propulsion and energy. Digitalization will facilitate automation and lead to smart ships, positively affecting safety and environmental performance. Communications will play a key role in the future of maritime technology, providing smart shipping, IoT, advanced communications, and artificial intelligence. New technologies that will revolutionize the maritime industry include blockchain, augmented reality, and unmanned land vehicles. The industry must adapt to these changes to remain competitive.

Results and discussion. The maritime industry is expected to see a wide range of trends in the coming years, including AI, clean energy sources, and autonomous ships. Other trends include digital sensing, port automation, and blockchain. Industry experts predict that collaboration, green transition, security, and energy cost trends will be important in 2023. Green technology, electric ships, big data and predictive analytics are among the forthcoming innovations in the shipping industry.

Innovation in maritime transport can be achieved through the development and implementation of algorithm. Here are some steps that can be taken to implement an algorithm for innovation in maritime transport:

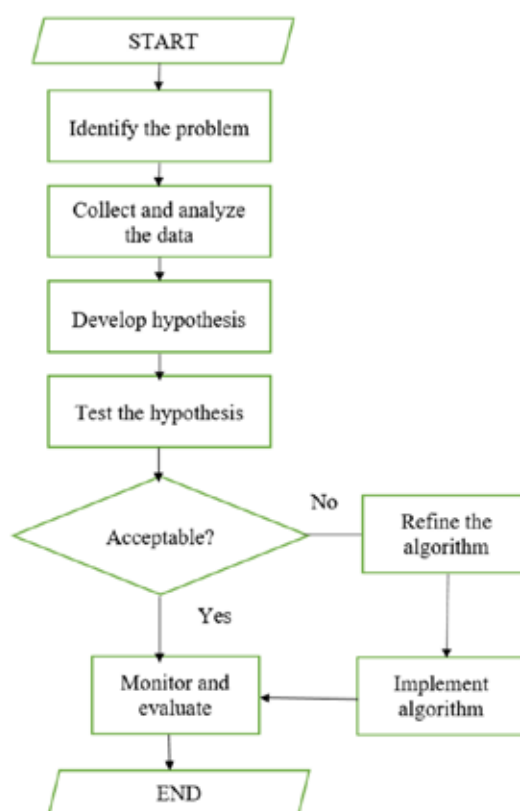


Fig. 3. Innovation technologies implementation algorithm

Starting with identifying the specific problem that needs to be solved in maritime transport, it could be anything from reducing fuel consumption to optimizing shipping routes. Gather data related to the problem identified which could include information on ship performance, weather patterns, shipping routes, and cargo volumes. Analyze the data using statistical analysis and data visualization techniques to explore the data and identify patterns and correlations. Based on the data analysis, develop a hypothesis about how to solve the problem. For example, the hypothesis that adjusting vessel speed to weather conditions can significantly reduce fuel consumption. Develop an algorithm or formula based on your hypothesis and test it using real-world data. This could involve running simulations or conducting experiments on actual ships. Based on the results of your tests, refine your algorithm or formula to improve its accuracy and effectiveness. Once you have a robust algorithm or formula, implement it on a wider scale in the maritime industry. This could involve collaborating with shipping companies or working with government agencies to promote the adoption of the new technology. Finally, monitor the performance of your algorithm over time and evaluate its impact on the industry. Use this feedback to continue refining the algorithm and improving its effectiveness. By following these steps, innovative algorithms can be created to help solve maritime transportation problems and move the industry forward.

Conclusion. Several strategies can be used to promote technological innovation in the maritime transport sector, primarily by encouraging and investing in research and development activities to develop new technologies and improve existing ones. This can include partnerships with universities, research institutes and other companies. Governments can provide financial incentives and funding for companies that invest in new technologies and innovations. This can include tax breaks, grants and subsidies. Collaboration between industry players should be encouraged to share knowledge and resources, and to work together to develop new technologies. Governments can also create regulations and standards that promote innovation and new technologies. These can include emissions standards, safety standards, and performance standards. Companies can use open innovation strategies to collaborate with external partners to develop new technologies. This can include partnerships with startups, universities, and other companies in the industry. The use of digital technologies such as big data, IoT and blockchain can help improve efficiency, reduce costs and increase transparency in the maritime transportation industry. The development and adoption of sustainable technologies that promote environmental sustainability, such as low-emission fuels, renewable energy and green ports, are just a few of the basic areas that can be used to promote technological innovation in maritime transport.

REFERENCES

1. 8 Technology Trends Transforming the Maritime Industry. (2021). *Know how*. Matuszak, J. Retrieved from:<https://knowhow.distrelec.com/defence-aerospace-and-marine/8-technology-trends-transforming-the-maritime-industry>
2. Technology will help maritime transport navigate through the pandemic-and beyond. (2020). *World bank blogs*. Yin, L. Retrieved from:<https://blogs.worldbank.org>

3. 10 Smart Ship Technologies For The Maritime Industry. Menon A. (2021). *MarineInsight*. Menon, A. Retrieved from: <https://www.marineinsight.com/know-more/10-smart-ship-technologies-that-maritime-industry>
4. Babicz J. (2015). *Wärtsilä encyclopedia of ship technology*. 2nd edition, Helsinki, 663 p.
5. Xu, J., Li, Z., Sha, H., Wu, S. (2023). Status of Research and Application Cases in Intelligent Shipping. In book: Proceedings of PIANC Smart Rivers 2022. doi:10.1007/978-981-19-6138-0_81
6. Wagner, N., Wisnicki, B., (2022). The Importance of Emerging Technologies to the Increasing of Corporate Sustainability in Shipping Companies. *Sustainability*, 14, 23. doi: 10.3390/su141912475
7. Gavalas, D., Syriopoulos, T. & Roumpis, E. (2022). Digital adoption and efficiency in the maritime industry. *Journal of Shipping and Trade*, 7, 11. doi:10.1186/s41072-022-00111-y
8. Milić-Beran, Ivona & Milošević, Dragana & Šekularac-Ivošević, Senka. (2021). Teacher of the future in maritime education and training. *Knowledge International Journal*, 46, 119–125.
9. Sekularac-Ivošević, Senka. (2021). The Priority Areas of Innovations in Maritime Industry: An Application to the Adriatic Marine Environment. doi:10.1007/698_2020_712
10. Polejack, Andrei. (2023). Innovate or Fade-Introducing Ocean Innovation Diplomacy to the Maritime Sector. doi:10.1007/978-3-031-24740-8_2
11. Browne, K., Raff, M. (2023). The Private Law Perspective-Rights of Salvage and Innovation in the United States Admiralty Courts. doi:10.1007/978-3-031-10568-5_6
12. Melnyk, O., Onishchenko, O., Onyshchenko, S., Voloshyn, A., Kalinichenko, Y., Rossomakha, O., Naleva, G., Rossomakha, O. (2022). Autonomous Ships Concept and Mathematical Models Application in their Steering Process Control. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 16, (3), 553–559. doi:10.12716/1001.16.03.18
13. Melnyk, O., Onyshchenko, S. (2022). Navigational safety assessment based on Markov-model approach. *Scientific Journal of Maritime Research*, 36 (2), 328–337. doi:10.31217/p.36.2.16

ВПЛИВ ШВИДКІСНОГО РЕЖИМУ НА ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ДОРОЖНЬОГО РУХУ

О.В. Рябушенко¹, І.С. Наглюк²

¹к.т.н., доцент кафедри «Організації та безпеки дорожнього руху»,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-8415-5733

²д.т.н., професор кафедри «Організації та безпеки дорожнього руху»,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-9411-4479

Анотація

Вступ. Головним завданням функціонування автомобільного транспорту є задоволення потреби громадян та господарств в перевезеннях із забезпеченням достатнього рівня ефективності цього процесу. Разом з тим, найбільші ризики для здоров'я та життя людини, а також актуальні екологічні проблеми пов'язані з дорожнім рухом. В найбільшій мірі ця двоякість проявляється при виборі швидкісного режиму руху. Прагнення до економії часу поїздки часто призводить до перевищення встановленого обмеження швидкості, що негативно впливає на безпеку дорожнього руху. Тому актуальним є дослідження впливу швидкісного режиму на ефективність транспортного процесу. **Мета.** Метою даного дослідження ставилося проаналізувати вплив швидкісного режиму на показники ефективності дорожнього руху на типових ділянках доріг за межами міста. **Результати.** Для реалізації поставленої мети було проведено аналіз руху легкового автомобіля на двох маршрутах, що проходили по ділянках доріг з різними дорожніми умовами. По кожному маршруту автомобіль рухався у трьох режимах обмеження швидкості, що становили 90, 110 та 130 км/год. В результаті обробки GPS треків руху автомобіля були проаналізовані розподіли миттєвих швидкостей та побудовані гістограми руху в координатах «час руху – відстань» та «відстань – швидкість». Для кожного з режимів обмеження швидкості були розраховані значення середньої технічної швидкості та часу сполучення на маршруті, а також показники якості умов руху, зокрема шум прискорення та градієнт енергії. **Висновки.** В результаті проведення експериментальних досліджень було встановлено, що підвищення швидкісного режиму на ділянці двосмугової дороги за межами міста при фактично існуючому рівні завантаженості рухом не призводить до покращення показників ефективності транспортного процесу. Для ділянок доріг із розділювальною смугою при підвищенні швидкісного режиму спостерігається пропорційне збільшення середньої технічної швидкості, що дозволяє очікувати підвищити техніко-експлуатаційні показники транспортного процесу. Для обох типів доріг підвищення швидкісного режиму призводить до зменшення стабільності руху, що виражається у зростанні шуму

прискорення та градієнт енергії. Цей фактор може негативно впливати на безпеку дорожнього руху та привести до погіршення умов праці водія.

Ключові слова: *дорожній рух, середня технічна швидкість, швидкість руху, обмеження швидкості, дорожні умови, показники ефективності.*

INFLUENCE OF SPEED MODE ON TRAFFIC EFFICIENCY INDICATORS

O.V. Ryabushenko¹, I.S. Nahliuk²

¹PhD, Associate Professor, Associate Professor
of the Department of “Traffic Management and Road Safety”,
Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-8415-5733

²Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor
of the Department of “Traffic Management and Road Safety”,
Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-9411-4479

Summary

Introduction. *The main task of the operation of road transport is to meet the needs of citizens and businesses in transportation while ensuring a sufficient level of process efficiency. At the same time, the greatest risks to human health and life, as well as current environmental problems, are related to road traffic. To the greatest extent, this duality is manifested when choosing a high-speed mode of movement. The desire to save travel time often leads to exceeding the established speed limit, which negatively affects road safety. Therefore, the study of the influence of the speed regime on the efficiency of the transport process is relevant. Goal. The purpose of this study was to analyze the influence of the speed regime on traffic efficiency indicators on typical road sections outside the city. The results. In order to realize the set goal, an analysis of the movement of a passenger car was carried out on two routes passing through sections of roads with different road conditions. On each route, the car moved in three speed limit modes, which were 90, 110 and 130 km/h. As a result of the GPS processing of car movement tracks, instantaneous speed distributions were analyzed and movement histograms were constructed in the "movement time – distance" and "distance – speed" coordinates. For each of the speed limit modes, the values of the average technical speed and connection time on the route were calculated, as well as indicators of the quality of traffic conditions, in particular, acceleration noise and energy gradient. Conclusions. As a result of conducting experimental studies, it was established that increasing the speed regime on a section of a two-lane road outside the city limits at the actual existing level of traffic congestion does not lead to an improvement in the efficiency of the transport process. For sections of roads with a dividing strip, when the speed regime is increased, a proportional increase in the average technical speed is observed, which allows us to expect an increase in the technical and operational indicators of the transport process. For both types of roads, increasing the speed regime leads to a decrease in traffic stability, which is expressed in an increase in acceleration noise and an energy gradient. This factor can negatively affect road traffic safety and lead to deterioration of the driver's working conditions.*

Key words: *road traffic, average speed, actual speed, speed limit, road conditions, performance indicator.*

Вступ. Головним ефектом від використання автомобільного транспорту можна вважати економію часу при доставці вантажів та пасажирів, що забезпечується у першу чергу достатньо високими значеннями швидкості сполучення на маршрутах. Це обумовлює загальне прагнення учасників транспортного процесу до забезпечення високих середніх швидкостей руху транспортних засобів на всіх ділянках маршруту. Так само як і при здійсненні особистої поїздки, прагнення до економії часу змушує водія рухатися з найбільшою швидкістю, яку допускають дорожні або транспортні умови та з урахуванням встановлених обмежень швидкісного режиму. Цей фактор негативно впливає на безпеку дорожнього руху, оскільки те, що збільшення швидкості призводить до зростання як ймовірності ДТП, так і тяжкості наслідків події є загальновідомим фактом.

Недооцінка небезпеки підвищеного швидкісного режиму під час здійснення поїздки разом із переоцінкою ефекту економії часу заважає як водіям так і перевізникам обирати оптимальні режими руху з урахуванням усіх факторів. Тому дослідження впливу швидкісного режиму на показники ефективності руху на різних ділянках автомобільних доріг є актуальним завданням.

Постановка проблеми. Однією з причин перевищення безпечної швидкості водіями транспортних засобів є природне прагнення всіх учасників транспортного процесу до підвищення його ефективності, що виражається у збільшенні швидкості сполучення та зменшення часу поїздки. Рух з підвищеною швидкістю на окремих ділянках маршруту дійсно може дати ефект, що полягає у збільшенні середньої технічної швидкості та швидкості сполучення, але на відносну його величину значно впливають дорожні та транспортні умови руху на конкретному маршруті. Це обумовлює додаткові ризики для безпеки дорожнього руху на міжміських дорогах.

Нехтування ризиками для безпеки дорожнього руху при виборі швидкісного режиму в значній мірі обумовлено суб'єктивним сприйняттям водіями миттєвої швидкості руху та впливу цього фактору на остаточні результати поїздки за певним маршрутом. Тому проблема забезпечення безпеки руху стає соціально-психологічною – переконати водіїв рухатися в рамках дозволених швидкісних обмежень.

Якщо значення середньої технічної швидкості та часу сполучення є усередненими показниками поїздки, то рівень комфорту та безпеки характеризується показниками стабільності режиму руху, які не можуть бути оцінені безпосередньо, але в певній мірі впливають на умови праці водію. Кількісно цей фактор може бути оцінений так званими енергетичними критеріями дорожнього руху, такими, як шум прискорення, градієнт швидкості, градієнт енергії.

Наявність достовірних даних про вплив швидкісного режиму на показники ефективності та якості дорожнього руху на ділянках доріг різних типів також сприятиме удосконаленню системи управління швидкістю руху транспортних засобів шляхом більш раціонального та обгрунтованого підходу до встановлення обмежень швидкості. У зв'язку із зазначеним, метою даного дослідження

ставилося проаналізувати вплив швидкісного режиму на показники ефективності дорожнього руху на дорогах за межами міста.

Аналіз публікацій за темою дослідження. Класичними дослідженнями, що показують зв'язок між швидкості руху і ризиком ДТП можна вважати роботи [1, 2]. Також відомо, що перевищення швидкості є обтяжуючою фактором виникнення травм і смертей у всіх видах ДТП [3]. В роботі [4] вказується, що у країнах, що розвиваються, перевищення допустимої швидкості є причиною 30% ДТП зі смертельними наслідками.

Відомо, що на фактичний швидкісний режим впливають фактор водія, характеристики транспортного засобу, дорожні та транспортні умови. Основними показниками впливу характеристик транспортного засобу на перевищення швидкості руху є енергоозброєність і міра конструктивної досконалості автомобілів [5]. З боку водія на перевищення швидкості впливають фактори цілей поїздки, наявність пасажирів а також гендерний фактор [6]. В роботах [7, 8] у якості причини перевищення швидкісного режиму відзначається психологічна непогодженість водія з встановленими обмеженнями швидкості. З боку транспортних умов, відомо, що збільшення рівня завантаженості дороги призводить до зниження швидкісного режиму [9].

Відомі роботи, в яких аналізується вплив обмеження швидкості на показники ефективності дорожнього руху [10, 11]. Якщо швидкісний режим руху на міських маршрутах в основному залежить від рівня завантаження доріг та параметрів регулювання дорожнього руху, в умовах міжміського руху зменшення часу сполучення може бути досягнене в більшій мірі саме за рахунок підвищення швидкісного режиму руху. В роботі [12] відзначається, що оптимальний режим обмеження швидкості не приводить до зростання часу сполучення, а на швидкісних магістралях ефективність транспортного процесу може бути підвищена за рахунок збільшення обмеження швидкості. Дослідження впливу перевищення швидкості на показники ефективності руху в умовах великого українського міста показали незначний вплив цього фактору на швидкість сполучення при погіршенні енергетичних критеріїв якості транспортного процесу [13].

Описання методики дослідження. Оцінка швидкісного режиму руху на ділянках автомобільних доріг є достатньо розповсюдженим завданням при проведенні експериментальних досліджень в сфері організації дорожнього руху. В будь-якому разі такі дослідження зводяться до вимірювання швидкості окремого автомобіля.

Для проведення експериментальних досліджень з метою визначення технічної швидкості руху на ділянках доріг поза межами міста було вирішено використовувати метод аналізу GPS треків автомобіля при його русі в якості їздовий лабораторії в транспортному потоці. Дослідження проводилися на легковому автомобілі типу седан з двигуном робочим об'ємом 1,8 см³. Для запису GPS треків використовувався навігатор марки Pioneer PI-5730 та програма GPS-позиціонування Navitel.

В якості експериментальних маршрутів були обрані дві ділянки на дорозі міжнародного значення М-03 Київ-Харків-Довжанський поблизу міста Харкова (рис. 1). Маршрут №1: ділянка окружної дороги від розв'язки з вул. Харківське шосе до АЗС «ОККО». Довжина маршруту – 22,96 км. Маршрут №2: ділянка від

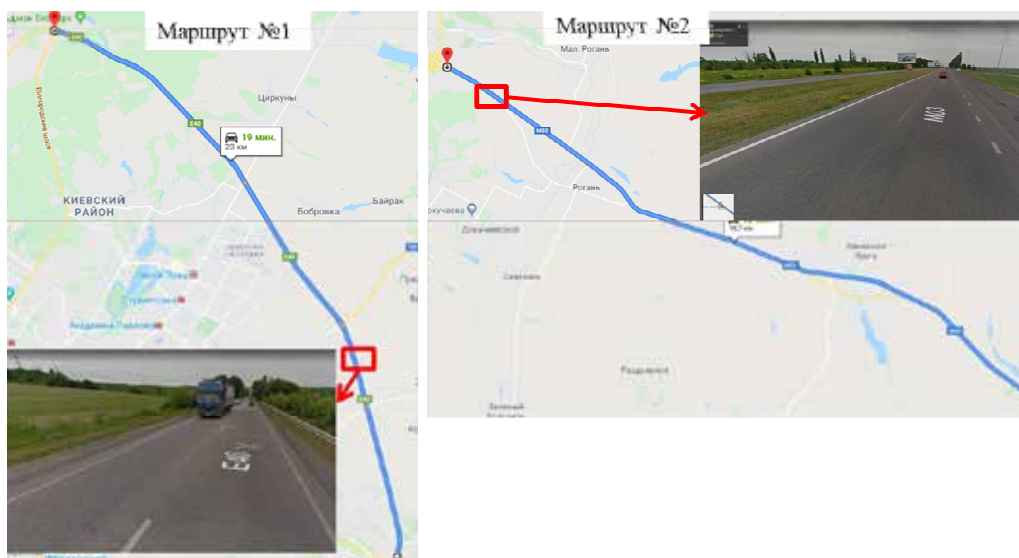


Рис. 1. Розташування обраних експериментальних маршрутів

поста поліції на виїзді з міста Харкова до стели з літаком МІГ-21 на в'їзді в місто м. Гугуїв. Довжина маршруту – 18,77 км.

Ділянка маршруту №1 мала двосмугову проїзну частину (по одній смузі у кожному напрямку) із додаванням додаткової смуги на окремих ділянках. На маршруті №2 дорога мала розділювальну смугу, тому майже на всьому протязі рух відбувався по двосмуговій проїзній частині в умовах однобічного руху. Обрані ділянки маршрутів можна вважати типовими для доріг за межами населених пунктів, що дозволяє оцінити вплив типу дороги на режим руху.

По кожному з маршрутів експериментальні поїздки відбувалися в однакових умовах, в робочі дні тижня з 10 до 12 години. В процесі руху не виникало додаткових затримок з причин, не пов'язаних з організацією дорожнього руху.

Рух за кожним з маршрутів відбувався поперемінно у трьох прийнятих режимах обмеження швидкості руху, яких за умов експерименту мав дотримуватися водій: 90 км/год, 110 км/год, 130 км/год. Оскільки маршрут № 2 проходив через 2 населених пункти (с.м.т. Велика Рогань та с.м.т. Кам'яна Яруга) на цих ділянках водій дотримувався обмеження швидкості 70 км/год, як і переважна більшість водіїв, що користуються толерантністю до встановленого в населених пунктах обмеження швидкості. Окрім швидкісного режиму в процесі руху виконувалися всі вимоги Правил дорожнього руху.

Під час кожної поїздки записувався GPS трек руху автомобіля. Далі за допомогою програми GPS Track Editor трек розшифровувався та представлявся у вигляді сукупності строк даних, подальша обробка яких виконувалася в програмі Excel.

Результати дослідження. В результаті обробки GPS треків руху автомобіля за експериментальними маршрутами отримувалися значення миттєвої швидкості руху з інтервалом 1 с. Така точність запису швидкості дозволяє відстежувати найменші коливання режиму руху та фіксувати затримки та простої, що виникають під час поїздки.

Результати статистичної обробки масивів даних миттєвої швидкості руху у кожному з режимів руху наведено в таблицях 1 та 2.

Таблиця 1

Результати обробки масивів даних миттєвої швидкості на маршруті №1

Статистична характеристика розподілу	Режим обмеження швидкості		
	90 км/год	110 км/год	130 км/год
Середнє значення	72,36	79,38	72,91
Медіана	78,85	83,10	71,40
Мода	85,70	85,50	55,10
Дисперсія	260,49	245,66	383,57
Мінімальне значення	18,30	5,60	0,00
Максимальне значення	93,70	102,90	115,90

Таблиця 2

Результати обробки масивів даних миттєвої швидкості на маршруті №2

Статистична характеристика розподілу	Режим обмеження швидкості		
	90 км/год	110 км/год	130 км/год
Середнє значення	82,48	94,03	107,88
Медіана	85,50	102,80	117,40
Мода	86,40	106,70	127,40
Дисперсія	79,88	290,63	560,56
Мінімальне значення	16,40	29,20	14,90
Максимальне значення	97,40	115,80	132,10

Можна побачити, що на маршруті №1 нерівномірність розподілення значень миттєвої швидкості є більш нерівномірним порівняно з маршрутом №2. Причиною такого розподілення є те, що в умовах порівняно більшого рівня завантаження дороги на маршруті №1, водій був змушений зменшувати швидкість руху на окремих ділянках. Тоді як умови руху на маршруті №2 дозволяли майже в повній мірі реалізовувати встановлений умовами експерименту швидкісний режим.

Відмінності фактичних режимів руху на обох маршрутах можна наочно проілюструвати за допомогою діаграмми в координатах «час руху – відстань» та «відстань – швидкість» (рис. 2, 3).

Можна побачити, що під час руху по ділянці №1 спостерігаються значні коливання швидкості. Це пов'язано з наявністю перешкод з боку іншого транспорту в умовах порівняно більшого рівня завантаженості дороги та необхідності виконувати обгін інших ТЗ. При цьому на значній частині окружної дороги обгін був заборонений та водій був змушений рухатися зі швидкістю транспортного потоку. В місцях розташування перехресть відбувалися додаткові втрати часу, пов'язані з регулюванням дорожнього руху.

На ділянці №2 швидкісний режим є більш стабільним та майже відсутні змушені зниження швидкості під час руху. Такі результати обумовлені умовами переважно одностороннього руху двосмуговою проїзною частиною, що зменшувало рівень завантаженості дороги рухом та дозволяло водію в повній мірі реалізовувати прийнятний швидкісний режим.

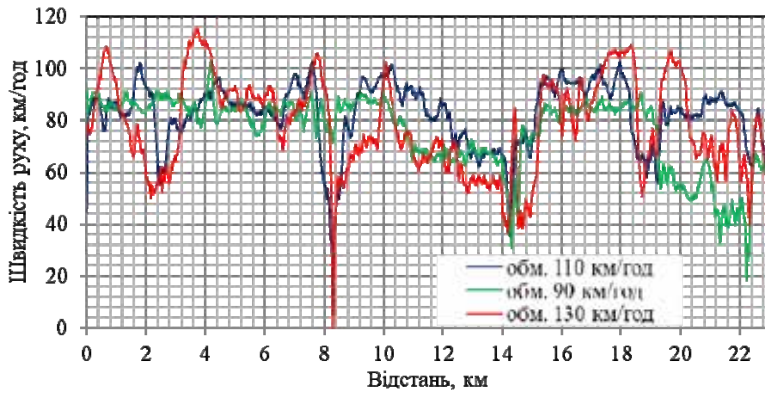
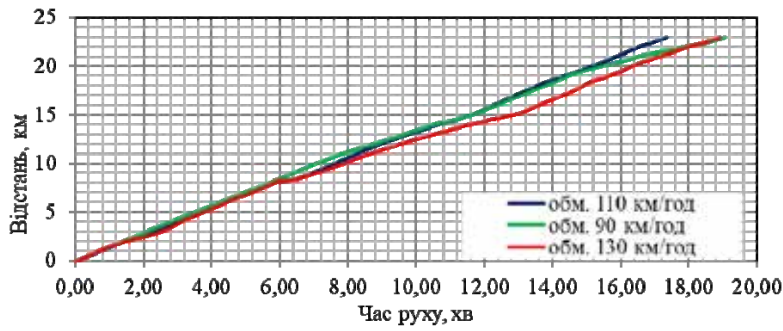


Рис. 2. Діаграми руху для маршруту №1

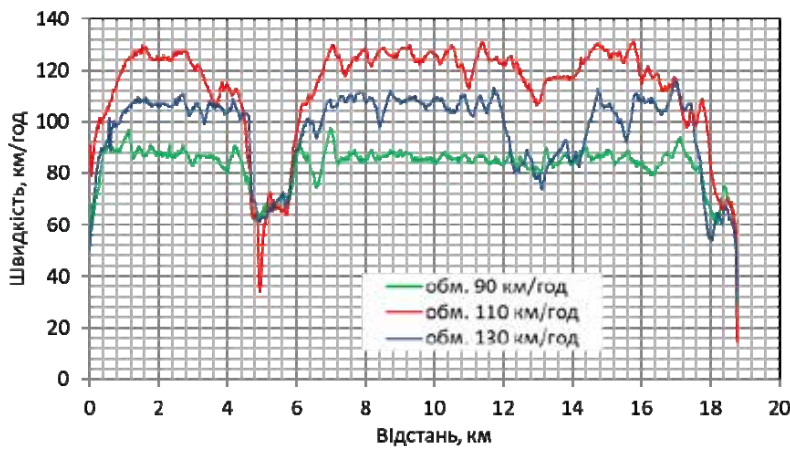
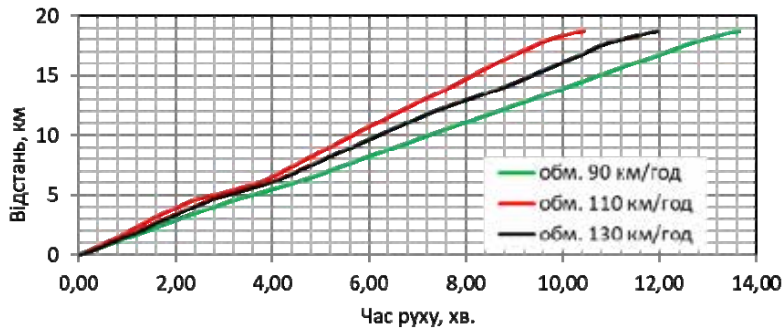


Рис. 3. Діаграми руху для маршруту №2

Можна констатувати що рух в умовах підвищеного обмеження швидкості майже не впливав на результати поїздки автомобіля за маршрутом №1. На відміну від маршруту № 2, де очевидна різниця у режимах руху в залежності від обраного обмеження швидкості.

Безперервна фіксація режиму руху автомобіля під час досліджень дозволяє визначити ряд важливих показників якості організації дорожнього руху на експериментальних маршрутах за умови різних обмежень швидкості руху. Такими показниками були обрані середня технічна швидкість, темп руху, питомий час в русі, шум прискорення, градієнт енергії. Результати розрахунків зазначених показників та використані розрахункові залежності наведені в таблиці 3.

В наведених в таблиці 3 розрахункових залежностях використані наступні умовні позначення: V_{mi} – миттєва швидкість для i -го секундного інтервалу, км./год.; n – кількість інтервалів; L_m – довжина маршруту, км; V_r – середня швидкість у русі, км/год (обиралися інтервали зі швидкістю не менше 5 км/год); j_t – миттєве прискорення, м/с²; T – час руху, с; $j_t \cdot V$ – твір прискорення та швидкості на інтервалі, м²/с³.

Аналізуючи отримані результати можна зазначити, що для маршруту №1 підвищення обмеження швидкості майже не приводить до зміни таких показників ефективності транспортного процесу, як середня технічна швидкість, темп руху, час сполучення (рис. 4). При цьому спостерігається зростання шуму

Таблиця 3

Порівняльні результати оцінки характеристик якості руху на маршрутах для різних значень обмеження швидкості

Показник	Розрахункова залежність	Розрахункові значення показники режиму руху					
		Для маршруту №1 при обмеженні швидкості			Для маршруту №2 при обмеженні швидкості		
		90 км/год	110 км/год	130 км/год	90 км/год	110 км/год	130 км/год
Середня технічна швидкість, км/год	$\bar{V}_T = \frac{\sum_{i=1}^n V_{mi}}{n}$	72,35	79,4	72,9	82,5	94,1	107,9
Час сполучення, хв.	$t_c = \frac{60 \cdot L_m}{V_T}$	19,05	17,35	18,90	13,65	11,97	10,43
Темп руху, хв./км	$T = \frac{1}{V_c}$	0,829	0,756	0,823	0,727	0,638	0,556
Питомий час в русі, хв./км	$T_r = \frac{1}{V_r}$	0,831	0,756	0,820	0,728	0,637	0,557
Шум прискорення, м/с ²	$\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (j_t - \bar{j}_t)^2 dt}$	0,5005	0,6177	0,6344	0,4375	0,5634	0,5879
Градієнт енергії, м/с ²	$G_E = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (j_i \cdot V_i - \bar{j}_i \cdot \bar{V}_i)^2}$	0,5024	0,6177	0,6359	0,4405	0,5633	0,5879

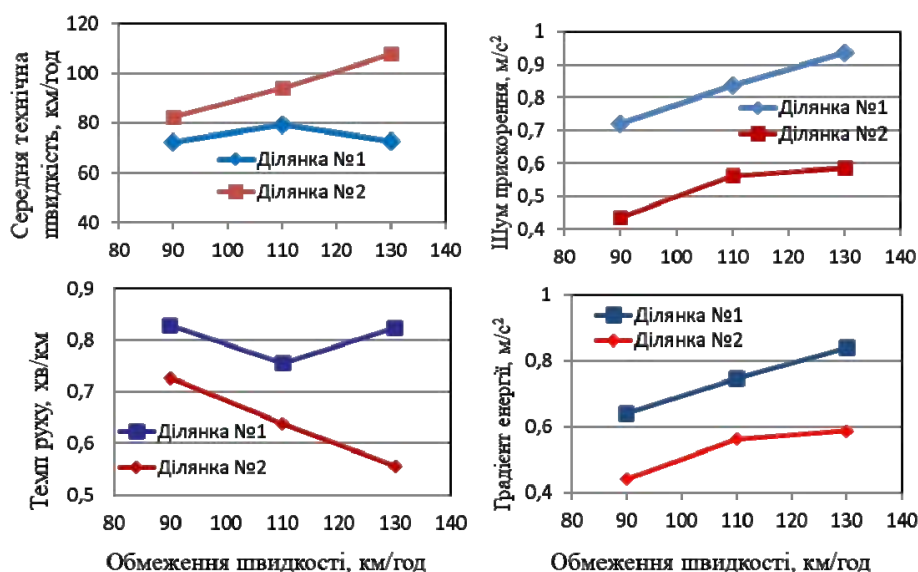


Рис. 4. Зміна показників руху на маршрутах в залежності від обраного обмеження швидкості

прискорення та градієнту енергії, що характеризує в тому числі ускладнення умов праці водія.

Стосовно результатів досліджень для маршруту №2 можна зазначити, що підвищення швидкісного режиму призводить до деякого покращення показників ефективності транспортного процесу, що виражається у пропорційному збільшенні середньої технічної швидкості та зменшенні темпу руху та часу сполучення (рис. 4). Також спостерігається зростання шуму прискорення та градієнту енергії, хоча абсолютні значення цих показників виявляються значно меншими, ніж для маршруту №1.

Висновки. В результаті дослідження було встановлено, що підвищення швидкісного режиму на ділянці двосмуговою дороги за межами міста при фактично існуючому рівні завантаженості рухом не призводить до покращення показників ефективності транспортного процесу. Можна сказати, що фактичні значення середньої технічної швидкості та часу сполучення для таких ділянок доріг мають випадковий характер та залежать від дорожніх та транспортних умов на момент здійснення поїздки, тому перевищення встановленої Правилами швидкості руху не може бути виправдано прагненням до підвищення ефективності транспортного процесу.

Для ділянок доріг із розділювальною смугою можна констатувати, що при підвищенні швидкісного режиму спостерігається пропорційне збільшення середньої технічної швидкості, що потенційно дозволить покращити техніко-експлуатаційні показники транспортного процесу.

Для обох типів доріг підвищення швидкісного режиму призводить до зменшення стабільності режиму руху, що виражається у зростанні шуму прискорення та градієнту енергії. Цей фактор може негативно впливати на безпеку дорожнього руху.

Дані про зміну шуму прискорення та градієнт енергії в залежності від швидкісного режиму в реальних умовах руху на різних ділянках доріг могли б лягти в основу розробки концепції управління швидкістю руху транспортних потоків. Ключовим елементом такої концепції були б рекомендації по встановленню обмежень швидкості руху на ділянках автомобільних доріг, які б дозволяли збільшити показники ефективності транспортного процесу та водночас забезпечували прийнятний рівень безпеки дорожнього руху.

ЛІТЕРАТУРА

1. Letty Aarts, Ingrid van Schagen. Driving speed and the risk of road crashes: A review. *Accident Analysis and Prevention*, 38. 2005. P. 215–224.
2. CN. Kloeden, G. Ponte, J. McLean. Travelling speed and risk of crash involvement on rural roads. *Road safety research report (Australian Transport Safety Bureau)*. 2001. CR 204. ISBN: 0642255687
3. Finch D.J. Speed, speed limits and accidents. *Crowthorne, Transport Research Laboratory*. 1994. No 32. PR 58. ISSN: 0968-4093
4. W. Odero, P. Garner, A. Zwi. Road traffic injuries in developing countries: a comprehensive review of epidemiological studies. *Tropical Medicine and Int. Health*. 1997. Vol. 2. P. 445–460. Doi:10.1111/j.1365-3156.1997.tb00167.x
5. Chao Gao, Jinliang Xu, Xingli Jia, Yaping Dong, Han Ru. Influence of Large Vehicles on the Speed of Expressway Traffic Flow. *Advances in Civil Engineering*. 2020. Volume 4. Doi: 10.1155/2020/2454106
6. Richard Tay, Philip Champness, Barry Watson. Personality and speeding: Some policy implications. *IATSS Research*. 2003. Vol. 27, Issue 1, P. 68–74. Doi: 10.1016/S0386-1112(14)60060-1
7. B. N. Fildes, S. J. Lee. The speed review: road environment, behaviour, speed limits, enforcement and crashes. *Tech. Rep., Federal Office of Road Safety, Department of Transport and Communications, Canberra, Australia*. 1993, Report CR127.
8. Y. M. Lee, S. Y. Chong, K. Goonting, E. Sheppard. The effect of speed limit credibility on drivers' speed choice. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2017. Vol. 45. P. 43–53. Doi: 10.1016/j.trf.2016.11.011
9. Francesc Soriguera, Irene Martínez, Marcel Sala, Mónica Menéndez. Effects of low speed limits on freeway traffic flow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2017. Vol. 77. P. 257–274. Doi: 10.1016/j.trc.2017.01.024
10. Shigeru Morichi, Soichiro Masuda, Surya Raj Acharya, Naohiko Hibino. Cost benefit analysis of speed limit regulation for highways in Japan. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. 2005. Vol. 6. P. 1008 – 1020. Doi: 10.11175/easts.6.1008
11. Kay Fitzpatrick, Brian Shamburger, Dan Fambro. Design Speed, Operating Speed, and Posted Speed Survey. *Transportation Research Record*:

- Journal of the Transportation Research Board*. 2019. Volume: 1523, issue: 1. P. 55–60. Doi: 10.1177/0361198196152300107
12. Shuaian Wang. Efficiency and equity of speed limits in transportation networks. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*. 2013. Volume: 32. P. 61–75. Doi:10.1016/j.trc.2013.04.003.
13. Рябушенко О.В., Наглюк І.С. Вплив обмеження швидкості на показники ефективності дорожнього руху в умовах великого міста. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал*. 2017. №1(10). С. 97–101.

REFERENCES

1. Letty Aarts, Ingrid van Schagen. (2005). Driving speed and the risk of road crashes: A review. *Accident Analysis and Prevention*, 38, 215–224.
2. CN. Kloeden, G. Ponte, J. McLean. (2001). Travelling speed and risk of crash involvement on rural roads. *Road safety research report (Australian Transport Safety Bureau)*. CR 204. ISBN: 0642255687
3. Finch D.J., Kompfner P., Lockwood C.R. Maycock G. (1994). Speed, speed limits and accidents. *Crowthorne, Transport Research Laboratory*. Issue Number: PR 58. ISSN: 0968-4093
4. Odero, W., Garner, P. and Zwi, A. (1997). Road Traffic Injuries in Developing Countries: A Comprehensive Review of Epidemiological Studies. *Tropical Medicine & International Health*, 2, 445–460. doi:10.1111/j.1365-3156.1997.tb00167.x
5. Chao Gao, Jinliang Xu, Xingli Jia, Yaping Dong, Han Ru. (2020). Influence of Large Vehicles on the Speed of Expressway Traffic Flow. *Advances in Civil Engineering*. Volume 4. 1–9. Doi: 10.1155/2020/2454106
6. Tay R., Champness P., Watson B. (2003). Personality and speeding: Some policy implications. *IATSS Research*, 27, 68-74. doi: 10.1016/S0386-1112(14)60060-1
7. Fildes B.N., Lee S.J. (1993). The speed review: road environment, behaviour, speed limits, enforcement and crashes. *Tech. Rep., Federal Office of Road Safety, Department of Transport and Communications, Canberra, Australia.*, Report CR127.
8. Lee Y. M., Chong S. Y., Goonting K., Sheppard E. (2017). The effect of speed limit credibility on drivers' speed choice. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 45, 43–53. doi: 10.1016/j.trf.2016.11.011
9. Soriguera F., Martínez I., Sala M., Menéndez M. (2017). Effects of low speed limits on freeway traffic flow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 77, 257–274. doi:10.1016/j.trc.2017.01.024
10. Morichi S., Masuda S., Acharya S. R., Hibino N. (2005). Cost benefit analysis of speed limit regulation for highways in Japan. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 1008–1020. doi: 10.11175/easts.6.1008

11. Fitzpatrick K, Shamburger B., Fambro D. (2019). Design Speed, Operating Speed, and Posted Speed Survey. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1523, 55–60. doi: 10.1177/0361198196152300107.
12. Wang S. (2013). Efficiency and equity of speed limits in transportation networks. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*, 32, 61-75. doi:10.1016/j.trc.2013.04.003.
13. Ryabushenko O.V., Nagluuk I.S. (2017). The influence of the speed limit on traffic efficiency indicators in the conditions of a large city. [Vplyv obmezhennia shvydkosti na pokaznyky efektyvnosti dorozhnoho rukhu v umovakh velykoho mista.] *Modern technologies in mechanical engineering and transport*, 1(10), 97-101. [in Ukrainian].

ФОРМУВАННЯ ФРАХТОВОЇ СТАВКИ НА ОСНОВІ ОБМЕЖЕНИХ ОБСЯГІВ ВИХІДНИХ ДАНИХ

Н.В. Судник¹, М.С. Вільшанюк²

¹к.е.н., доцент кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень»

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

ORCID ID: 0000-0003-4800-9883

²старший викладач кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень»

ORCID ID: 0000-0001-5396-6691

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація

Вступ. Судноплавні компанії можуть надавати свої послуги через фрахтовий ринок. До сьогоднішнього дня склався відносно відкритий фрахтовий ринок, де переважає вільна конкуренція. При цьому світовий фрахтовий ринок є закритою системою, тобто у певний проміжок часу певна пропозиція зустрічає певний попит, співвідношення яких формує ціну морського перевезення. При цьому таку закритість можна назвати відносною. У світовому фрахтовому ринку є власні функціональні сектори, кожен з яких також має певний ступінь самостійності. У цілому нині стан фрахтового ринку характеризується його кон'юнктурою. Під час вивчення кон'юнктури визначається рух ринку, тобто тенденція зміни ставок до підвищення, зниження чи застою. Для аналізу стану фрахтового ринку потрібний доступ до інформації з динаміки ставок. Питання фрахтових ставок у морському бізнесі завжди є актуальним, складним через те, що інформація щодо формування розміру ставок закрита для вільного користування. Відсутність такої інформації не дозволяє оператору судна використовувати інструменти для варіювання у питанні утворювання угоди. **Мета.** Ця стаття дозволяє формувати приблизне значення фрахтової ставки, використовуючи запропоновану методіку двопараметрної апроксимації. Ця методика дасть змогу вивчати рух ринку, тенденції зміни ставок та дозволить операторам суден здійснювати вигідні угоди. **Результати.** За результатами розрахунків був обчислений розмір фінальної фрахтової ставки як середньої між фрахтовими ставками, що були розраховані за параметрами наблизеності кількості вантажу та протяжності рейсу, яка округляється до десятинного числа. **Висновки.** Отриманий результат дозволяє застосувати зазначену методіку на практиці. На основі розрахованого розміру фрахтових ставок за запропонованою методикою стає можливим зробити вигідні пропозиції клієнтам та забезпечити дохід оператора судна з перевезення вантажів умовним рейсом, який є невід'ємним та важливим елементом поставленого завдання.

Ключові слова: рейс, умовний рейс, судно, фрахтування, фрахтова ставка, методика двопараметрної апроксимації, оператор судна.

**FORMATION OF FREIGHT RATE BASED
ON LIMITED VOLUMES OF OUTPUT DATA**

N.V. Sudnyk¹, M.S. Vilshaniuk²

¹PhD, Associate Professor of the Department "Fleet Operation and Shipping Technology",
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-4800-9883

²Senior Lecturer of the Department "Fleet Operation and Maritime Transportation
Technology",
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-5396-6691

Summary

Introduction. Shipping companies can provide their services through the freight market. Until today, a relatively open freight market, dominated by free competition, has developed. At the same time, the world freight market is a closed system, that is, in a certain period of time, a certain offer meets a certain demand, the ratio of which forms the price of sea transportation. At the same time, such closure can be called relative. The global freight market has its own functional sectors, each of which also has a certain degree of independence. In general, the current state of the freight market is characterized by its conjuncture. During the study of the conjuncture, the movement of the market is determined, that is, the tendency of the rates to increase, decrease or stagnate. To analyze the state of the freight market, access to information on rate dynamics is required. The issue of freight rates in maritime business is always relevant, complicated due to the fact that information on the formation of rates is closed for free use. The absence of such information does not allow the vessel operator to use tools for variation in the matter of negotiating the deal. **Purpose.** This article allows you to form an approximate value of the freight rate using the proposed method of two-parameter approximation. This technique will make it possible to study market movements, trends in rate changes and allow court operators to make profitable deals. **Results.** Based on the results of the calculations, the size of the final freight rate was calculated as the average between the freight rates that were calculated based on the parameters of the approximation of the amount of cargo and the length of the voyage, which is rounded to a decimal number. **Conclusions.** The obtained result makes it possible to apply the specified method in practice. Based on the calculated amount of freight rates according to the proposed method, it becomes possible to make favorable offers to customers and ensure the income of the ship operator from the transportation of cargo on a conditional voyage, which is an integral and important element of the task.

Key words: voyage, conditional voyage, ship, chartering, freight rate, two-parameter approximation method, ship operator.

Постановка проблеми. В практичній діяльності розміри фрахтових ставок є закритою від вільного доступу інформацією, для деяких видів вантажів та напрямків – навіть комерційною таємницею. Але принципи формування фрахтових ставок піддаються опису економічними законами.

Загалом розмір фрахтової ставки залежить від середньої вартості суднового палива, середньої вартості вантажу (до 8% від кінцевої вартості вантажу складають витрати на перевезення), кількості вантажу до перевезення, протяжності рейсу, портів заходу, орендних ставок суден, загальній світовій економічній ситуації та за законами попиту та пропозиції – балансу кількості вантажу та вільного тоннажу на відповідному ринку. При чому, якщо не розглядати макроекономічні фактори та вартість на паливо, яка є приблизно однаковою для всіх суден на проміжку часу, розмір фрахтової ставки підвищується при збільшенні протяжності рейсу та зменшується при збільшенні кількості вантажу до перевезення. За цим принципом можна усереднити та проаналізувати залежність фрахтової ставки від кожного з показників для окремого виду вантажу та типорозміру судна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання впливу фрахтових ставок використання суден при транспортному обслуговуванні вантажу було розглянуто на роботах [1–3]. Формуванню ставок на світовому фрахтовому ринку було присвячено роботи [4–7].

Дослідження формування фрахтових ставок в умовах обмеженості даних є серед актуальних завдань, що потребують подальшого вивчення.

Мета даної статті полягає у запропонованому методі отримання приблизного значення фрахтової ставки за умови недостатньої повноти наявних вихідних даних за кількістю суднової партії та дальності перевезення окремо. Даний метод пропонується назвати методом двопараметрної апроксимації розміру фрахтової ставки.

Виклад основного матеріалу.

Для досягнення поставленої мети проведено аналіз:

- сучасного стану міжнародного та українського ринку зернових культур, у тому числі технологічно-транспортного аспекту цього ринку та наявної портової інфраструктури;
- аналіз можливих країн-імпортерів зернових культур з України в ЄС, у томи числі огляд найбільш використовуваних типорозмірів суховантажних суден, що експортують зернові вантажі з портів України.

Через неможливість знайти конкретні фрахтові ставки у вільному доступі пропонується методика двопараметрної апроксимації розміру фрахтової ставки на основі обмежених обсягів вихідних даних.

Приймається, що серед вихідних даних на конкретний період часу є певний масив $k = 1, q$, який складається з наступних даних – дальності рейсу, кількості перевезеного вантажу та розміру фрахтової ставки. Для кожного з i -тих вантажів до масиву, що розглядається, входять лише дані по аналогічному або схожому за транспортними характеристиками вантажу. При різній вартості вантажу, що розглядається, та вантажу з масиву даних розмір фрахтової ставки корегується за принципом, що фрахтова ставка включає до себе 5–8% від вартості 1 т. вантажу.

Таким чином формується масив вихідних модельних даних (табл. 1).

Для подальших розрахунків вводяться наступні позначення:

L_{ik}^M – модельна протяжність k -го рейсу з i -м вантажем, миль;

Q_{ik}^M – модельна кількість i -го вантажу, що перевозиться у k -му рейсі, т.;

f_{ik}^M – модельна фрахтова ставка за k -м рейсом для i -го вантажу, дол./т.

Таблиця 1

Масив вихідних даних для розрахунку f_{ij} за [7] та [8]

k	L_{ik}^M , миль	Q_{ik}^M , т.	f_{ik}^M , дол./т.	i = 1	–	–
1	1100	10000	23	Grains	Odessa	Alexandria
2	1100	25000	15	Grains	Odessa	Alexandria
3	1300	10000	26	Grains	Odessa	Lybia
4	1300	25000	18	Grains	Odessa	Lybia
5	2000	10000	29	Grains	Odessa	Almeria
6	2000	25000	19	Grains	Odessa	Almeria
7	6390	50000	35,5	Grains	Yuzhny	Cigading
8	5800	40000	31,5	Grains	Recalada	Bejaia
9	1100	60000	12,25	Grains	Odessa	Alexandria
10	8640	60000	34	Grains	Odessa	Qindao
q	–	–	–	–	–	–

Далі за цим модельним масивом знаходяться коефіцієнти залежності фрахтової ставки від протяжності рейсу (α_i^L) та кількості вантажу (α_i^Q) відповідно, дол./милю та дол./т.:

$$\alpha_i^L = \Sigma f_{ik}^M / \Sigma L_{ik}^M ; \quad (1)$$

$$\alpha_i^Q = \Sigma f_{ik}^M / \Sigma Q_{ik}^M ; \quad (2)$$

$$\alpha_1^L = (23 + 15 + 16 + 18 + 29 + 19 + 35,5 + 31,5 + 12,25 + 34) / (1100 + 1100 + 1300 + 1300 + 2000 + 2000 + 6390 + 5800 + 1100 + 8640) = 0,00791572;$$

$$\alpha_1^Q = (23 + 15 + 16 + 18 + 29 + 19 + 35,5 + 31,5 + 12,25 + 34) / (10000 + 25000 + 10000 + 25000 + 50000 + 40000 + 60000 + 60000) = 0,00077222.$$

Після цього серед масиву даних (табл.1) вибираються ті рейси k, кількість перевезеного вантажу в яких приблизно дорівнює кількості вантажу, наведеного для перевезення для j-го судна. У даному випадку для судна Vully, j=1, $Q_{11} = 34973,16$ т. ≈ 35000 т. Це модельні рейси k=2, k=4, k=6 та k=8, у межах 20000-40000 т. Така виборка робиться для збільшення точності розрахунків.

За обраними модельними рейсами розраховуються показники модельної фрахтової ставки за наближеною кількістю вантажу (f_{ij}^{MQ}), дол./т., модельна протяжність рейсу за наближеною кількістю вантажу (L_{ij}^{MQ}), миль, та модельна кількість вантажу за наближеною кількістю вантажу (Q_{ij}^{MQ}), т.:

$$f_{ij}^{MQ} = \Sigma f_{ik}^M / n, \text{ для } Q_{ik}^M \approx Q_{ij}; \quad (3)$$

$$L_{ij}^{MQ} = \Sigma L_{ik}^M / n, \text{ для } Q_{ik}^M \approx Q_{ij}; \quad (4)$$

$$Q_{ij}^{MQ} = \Sigma Q_{ik}^M / n, \text{ для } Q_{ik}^M \approx Q_{ij}; \quad (5)$$

$$f_{11}^{MQ} = (15 + 18 + 19 + 31,5) / 4 = 20,875;$$

$$L_{11}^{MQ} = (1100 + 1300 + 2000 + 5800) / 4 = 2550;$$

$$Q_{11}^{MQ} = (25000 + 25000 + 25000 + 40000) / 4 = 28750,$$

де n – кількість обраних модельних рейсів з масиву даних за наближеною кількістю вантажу. У даному випадку k = 2, 4, 6, 8 – n = 4.

Після цього знаходиться різниця значень показників між рейсом і-го вантажу j-м судном, для якого шукається фрахтова ставка, та модельним рейсом, за протяжністю рейсу (ΔL^{MQ}_{ij}), миль, та кількістю вантажу (ΔQ^{MQ}_{ij}), т.:

$$\Delta L^{MQ}_{ij} = L_{ij} - L^{MQ}_{ij}; \quad (6)$$

$$\Delta Q^{MQ}_{ij} = Q_{ij} - Q^{MQ}_{ij}; \quad (7)$$

$$\Delta L^{MQ}_{11} = 1865 - 2550 = -685;$$

$$\Delta Q^{MQ}_{11} = 35000 - 28750 = 6250.$$

Згідно до правил, за якими формуються фрахтові ставки, при збільшенні протяжності рейсу розмір фрахтової ставки збільшується, при збільшенні кількості вантажу розмір фрахтової ставки зменшується. Таким чином, при помноженні значень різниці протяжності рейсу між дійсним рейсом та модельним на коефіцієнт залежності фрахтової ставки від протяжності рейсу отримаємо, на скільки модельна фрахтова ставка збільшиться, а при помноженні значень різниці кількості вантажу між дійсним рейсом та модельним на коефіцієнт залежності фрахтової ставки від кількості вантажу отримаємо, на скільки модельна фрахтова ставка зменшиться. За цим принципом формується фрахтова ставка для і-го вантажу та j-го судна за параметром схожості кількості вантажу (f^Q_{ij}), дол./т.:

$$f^Q_{ij} = f^{MQ}_{ij} + (\alpha^L_i * \Delta L^{MQ}_{ij} - \alpha^Q_i * \Delta Q^{MQ}_{ij}) / 2; \quad (8)$$

$$f^Q_{11} = 20,875 + (0,0079157 * (-685) - 0,0007722 * 6250) / 2 = 15,75.$$

Таким чином розраховується значення фрахтової ставки за одним з двох параметрів – наближеністю кількості вантажу. Процес розрахунку значення фрахтової ставки за наближеністю протяжності рейсу є аналогічним.

У цьому випадку з масиву даних (табл. 1) обираються ті рейси k, у яких протяжність рейсу приблизно дорівнює протяжності рейсу, для якого розраховується розмір фрахтової ставки. Для умовного рейсу Південний-Таррагона, $i = 1$, це $L_{11} = 1865$ миль. Таким чином обираються рейси $k = 3, k = 4, k = 5$ та $k = 6$, у межах 1300-2000 миль.

За обраними модельними рейсами розраховуються показники модельної фрахтової ставки за наближеною протяжністю рейсу (f^{ML}_{ij}), дол./т., модельна протяжність рейсу за наближеною протяжністю рейсу (L^{ML}_{ij}), миль, та модельна кількість вантажу за протяжністю рейсу (Q^{MQ}_{ij}), т.:

$$f^{ML}_{ij} = \Sigma f^M_{ik} / n, \text{ для } L^M_{ik} \approx L_{ij}; \quad (9)$$

$$L^{ML}_{ij} = \Sigma L^M_{ik} / n, \text{ для } L^M_{ik} \approx L_{ij}; \quad (10)$$

$$Q^{ML}_{ij} = \Sigma Q^M_{ik} / n, \text{ для } L^M_{ik} \approx L_{ij}; \quad (11)$$

$$f^{ML}_{11} = (26 + 18 + 29 + 19) / 4 = 23;$$

$$L^{ML}_{11} = (1300 + 1300 + 2000 + 2000) / 4 = 1650;$$

$$Q^{ML}_{11} = (10000 + 25000 + 10000 + 25000) / 4 = 17500,$$

де n – кількість обраних модельних рейсів з масиву даних за наближеною кількістю вантажу. У даному випадку $k = 3, 4, 5, 6 - n = 4$.

Після цього знаходиться різниця значень показників між рейсом і-го вантажу

j -м судном, для якого шукається фрахтова ставка, та модельним рейсом, за протяжністю рейсу (ΔL_{ij}^{ML}), миль, та кількістю вантажу (ΔQ_{ij}^{ML}), т.:

$$\Delta L_{ij}^{ML} = L_{ij} - L_{ij}^{ML}; \quad (12)$$

$$\Delta Q_{ij}^{ML} = Q_{ij} - Q_{ij}^{ML}; \quad (13)$$

$$\Delta L_{11}^{ML} = 1865 - 1650 = 215;$$

$$\Delta Q_{11}^{ML} = 35000 - 17500 = 17500.$$

Фрахтова ставка для i -го вантажу та j -го судна за параметром схожості протяжності рейсу (f_{ij}^Q), дол./т., визначається за формулою:

$$f_{ij}^L = f_{ij}^{ML} + (\alpha_i^L * \Delta L_{ij}^{ML} - \alpha_i^Q * \Delta Q_{ij}^{ML}) / 2; \quad (14)$$

$$f_{11}^L = 23 + (0,0079157 * 215 - 0,0007722 * 17500) / 2 = 17,09.$$

За результатами формул (9) та (14) знаходиться розмір фінальної фрахтової ставки як середньої між фрахтовими ставками, що були розраховані за параметрами наближеності кількості вантажу та протяжності рейсу, яка округляється до десятичного числа, дол./т.:

$$f_{ij} = (f_{ij}^Q + f_{ij}^L) / 2; \quad (15)$$

$$f_{11} = (15,75 + 17,09) / 2 = 16,42 = 16,4.$$

Масив даних для знаходження фрахтових ставок кукурудзи (умовний вантаж) для рейсу $i = 1$ вже був наведений у табл. 1. Нижче вказані результати розрахунків фрахтових ставок для інших суден (табл. 2) та для фосфату навалом і вугілля (табл. 3 і табл. 4 відповідно).

Таблиця 2

Результат розрахунку фрахтових ставок для кукурудзи $i = 1$

Показник	Наближеність кількості вантажу			Показник	Наближеність протяжності рейсу		
	(2,4,6,8)	(7,9,10)	(6)		(3,4,5,6)	(3,4,5,6)	(3,4,5,6)
Вибір модельних рейсів, k	(2,4,6,8)	(7,9,10)	(6)	Вибір модельних рейсів, k	(3,4,5,6)	(3,4,5,6)	(3,4,5,6)
$j=(1,2,3)$	Vully	Lucky Sunday	Nasssauborg	$j=(1,2,3)$	Vully	Lucky Sunday	Nasssauborg
L_{ij}	1865	1865	1865	L_{ij}	1865	1865	1865
Q_{ij}	35000	69000	19000	Q_{ij}	35000	69000	19000
α_1^L	0,00792	0,00792	0,00792	α_1^L	0,00792	0,00792	0,00792
α_1^Q	0,00077	0,00077	0,00077	α_1^Q	0,00077	0,00077	0,00077
f_{ij}^{MQ}	21	27	19	f_{ij}^{ML}	23	23	23
L_{ij}^{MQ}	2550	5377	2000	L_{ij}^{ML}	1650	1650	1650
Q_{ij}^{MQ}	28750	56667	25000	Q_{ij}^{ML}	17500	17500	17500
ΔL_{ij}^{MQ}	-685	-3512	-135	ΔL_{ij}^{ML}	215	215	215
ΔQ_{ij}^{MQ}	6250	12333	-6000	ΔQ_{ij}^{ML}	17500	51500	1500
f_{ij}^Q	15,75	8,59	20,78	f_{ij}^L	17,09	3,97	23,27
f_{ij}	Vully			Lucky Sunday			Nasssauborg
	16,4			6,5			22

Таблиця 3

Масив вихідних даних для $i=2$ (фосфат навалом) та розрахунок фрахтових ставок відповідно за [7]

k	L_{ik}^M , МИЛЬ	Q_{ik}^M , т.	f_{ik}^M , дол./т. ¹	i=1	–	–	
1	4680	75000	10,12	Iron ore	Mormugao	Qingdao	
2	2800	70000	14,37	Iron ore	Port cartier	Rotterdam	
3	4680	50000	14,02	Iron ore	Mormugao	Qingdao	
4	4000	50000	10,77	Iron ore	Paradip	Qingdao	
5	3500	170000	3,17	Iron ore	Port Headland	Qingdao	
6	8600	160000	14,32	Iron ore	Yuzhny	Qingdao	
7	5500	170000	4,57	Iron ore	Tubarao	Rotterdam	
8	11200	170000	13,62	Iron ore	Tubarao	Qingdao	
9	8000	170000	8,82	Iron ore	Saldanha bay	Qingdao	
10	3200	30000	20	Phosptate	Casablanca	New York	
Показник	Наближеність кількості вантажу			Показник	Наближеність протяжності рейсу		
Вибір модельних рейсів, k	(10)	(4)	(10)	Вибір модельних рейсів, k	(10)	(10)	(10)
j=(1,2,3)	Vully	Lucky Sunday	Nasssauborg	j=(1,2,3)	Vully	Lucky Sunday	Nasssauborg
L_{2j}	4076	4076	4076	L_{2j}	4076	4076	4076
Q_{2j}	34500	60000	18500	Q_{2j}	34500	60000	18500
α_{2j}^L	0,00203	0,00203	0,00203	α_{2j}^L	0,00203	0,00203	0,00203
α_{2j}^Q	0,00010	0,00010	0,00010	α_{2j}^Q	0,00010	0,00010	0,00010
f_{2j}^{MQ}	20,0	11	20,0	f_{2j}^{ML}	20	20	20
L_{2j}^{MQ}	3200	4000	3200	L_{2j}^{ML}	3200	3200	3200
Q_{2j}^{MQ}	30000	50000	30000	Q_{2j}^{ML}	30000	30000	30000
ΔL_{2j}^{MQ}	0	76	0	ΔL_{2j}^{ML}	876	876	876
ΔQ_{2j}^{MQ}	4500	10000	-11500	ΔQ_{2j}^{ML}	4500	30000	-11500
f_{2j}^Q	20,66	10,34	21,47	f_{2j}^L	19,54	16,94	21,17
f_{2j}	Vully 21			Lucky Sunday 15			Nasssauborg 21,5

¹ – фрахтові ставки скореговані: ціна 1 т. фосфату – 88 дол./т., ціна 1 т. залізної руди – 124 дол./т., еластичність фрахтової ставки – 8%, фрахтова ставка для фосфату = ставка для залізної руди + (88 – 124) * 8%.

Таблиця 4

Масив вихідних даних для $i = 3$ (вугілля) та розрахунок фрахтових ставок відповідно за [7]

k	L_{ik}^M , МИЛЬ	Q_{ik}^M , т.	f_{ik}^M , дол./т.	i=1	–	–
1	2	3	4	5	6	7
1	3800	75000	14,1	Coal	Richards Bay	Mudra
2	3800	75000	8,8	Coal	Kalimantan	Mudra
3	4100	75000	14,45	Coal	Richards Bay	Krishnapatnam
4	4000	75000	12,45	Coal	Hay Point	Qingdao
5	5100	75000	15,25	Coal	Vancouver	Qingdao
6	8700	75000	20,5	Coal	Vancouver	Visakhapatnam

Продовження табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	
7	3500	70000	15	Coal	Hampton Roads	Rotterdam	
8	9700	70000	35,25	Coal	Hampton Roads	Paradip	
9	5400	70000	17	Coal	Hampton Roads	Isdemir	
10	3800	55000	17,1	Coal	Richards Bay	Kandla	
11	3800	55000	16	Coal	Richards Bay	Navlakhi	
12	4500	55000	16,5	Coal	Richards Bay	Paradip	
13	3800	55000	15,8	Coal	Richards Bay	Port Qasim	
Показ- ник	Наближеність кількості вантажу			Показ- ник	Наближеність протяжності рейсу		
Вибір модель- них рейсів, k	(10–13)	(1–9)	(10–13)	Вибір модель- них рейсів, k	(5,9)	(5,9)	(5,9)
j=(1,2,3)	Vully	Lucky Sunday	Nasssa- uborg	j=(1,2,3)	Vully	Lucky Sunday	Nasssa- uborg
L_{3j}	5650	5514	5650	L_{3j}	5650	5514	5650
Q_{3j}	35000	72000	19000	Q_{3j}	35000	72000	19000
α_3^L	0,00341	0,00341	0,00341	α_3^L	0,00341	0,00341	0,00341
α_3^Q	0,00025	0,00025	0,00025	α_3^Q	0,00025	0,00025	0,00025
f_{3j}^{MQ}	16,4	17	16,4	f_{3j}^{ML}	16	16	16
L_{3j}^{MQ}	3975	5344	3975	L_{3j}^{ML}	5250	5250	5250
Q_{3j}^{MQ}	55000	73333	55000	Q_{3j}^{ML}	72500	72500	72500
ΔL_{3j}^{MQ}	1675	170	1675	ΔL_{3j}^{ML}	400	264	400
ΔQ_{3j}^{MQ}	-20000	-1333	-36000	ΔQ_{3j}^{ML}	-37500	-500	-53500
f_{3j}^Q	21,68	17,43	23,67	f_{3j}^L	21,46	16,64	23,44
f_{3j}	Vully 21,5		Lucky Sunday 17		Nasssauborg 23,5		

Таким чином фрахтові ставки та дохід по кожному окремому рейсу та всіма рейсами в цілому за кожним судном наведений у табл. 5.

Таблиця 5

Фрахтові ставки та дохід кожного судна

i	Показники	Vully	Lucky Sunday	Nasssauborg
1	f_{1j} , дол./т.	16,4	6,5	22
	F_{1j} , дол.	567837,94	448308,82	418276,71
2	f_{2j} , дол./т.	21,5	17	23,5
	F_{2j} , дол.	736889,86	1019727,14	433216,17
3	f_{3j} , дол./т.	21	15	21,5
	F_{3j} , дол.	736143,37	1082307,69	408618,23
-	F_j , дол.	2040871,18	2550343,65	1260111,10

Висновки. Як було сказано раніше в даній статті була поставлена задача формування фрахтової ставки за допомогою використання методики двопараметрної апроксимації. Методика використовувалась за допомогою умовного рейсу,

та умовних вантажів. Таким чином можемо зробити наступні висновки, враховуючи дану методику з'явилась можливість формування фрахтових ставок та отримувати їх розміри якщо ця інформація є закритою від вільного доступу, для деяких видів вантажів та напрямків – навіть комерційною таємницею.

За результатами виконаної роботи у даної статті

- проаналізовано окремі умови щодо кон'юнктури фрахтового ринку;
- на основі розрахованого розміру фрахтових ставок за даною методикою, розраховано дохід оператора судна з перевезення вантажів умовним рейсом, який є невід'ємним і важливим елементом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Коскіна Ю.О. Розвиток теоретичних основ організації і управління змішаними перевезеннями масових вантажів за участю флоту. автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.22.01. Одеса, 2021. 43 с.
2. Лапкін О.І., Онищенко С.П., Коскіна Ю.О. Теорія і практика фрахтових операцій. Одеса, 2017. 151 с.
3. Онищенко С.П., Коскіна Ю.О. Дослідження впливу умов оферти на успішність укладання фрахтової угоди. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 2015. № 6/3 (78). С. 25–32.
4. Сотниченко Л.Л. Встановлення напрямків розвитку фрахтового ринку балкерного флоту. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету*. 2017. № 33. С. 203–209.
5. Onyschenko S.P., Koskina Yu.O. Ensuring the given level of the voyage efficiency considering the risks factors associated with the charter party terms. *Вісник ПДТУ. Серія: Технічні науки*. 2018, Вип. 37. С. 192-201
6. Onyschenko S.P., Koskina Yu.O. Factors determining a freight rate level. *The Current Stage Of Scientific And Technological Progress'2018. Conference proceedings*. March 27-28, 2018. Karlsruhe, Germany. p. 43–45.
7. S&P Global Platts Dry Freight Wire Issue 25 February 5, 2021 URL: https://f.hubspotusercontent30.net/hubfs/9030380/Platts_DryFreightWire_2021.pdf
8. Glogos greight report week 5 2021 URL: <http://glogos.net/wp-content/uploads/2021/02/Glogos-Freight-Report-Week-5.pdf>
9. Cahier des Tarifs de l'ANP URL: <https://www.anp.org.ma/fr/espace-professionnel/cahierdestarifs>
10. Seaport Manatee authority port tarrifs URL: <https://www.seaportmanatee.com/business/finance/>
11. Turkish straits calculator URL: <https://lethagencies.com/turkish-straits/calculator-turkish-straits>
12. Freight rates weekly report 2021 URL: <https://globalmaritimehub.com/wp-content/uploads/2021/02/Weekly-Report-Week-6-2021.pdf>

REFERENCES

1. Koskina Yu.O. (2021). Development of the theoretical foundations of the organization and management of mixed transportation of bulk cargo

- with the participation of the fleet. abstract dissertation. ... Dr. technical of science [Rozvytok teoretychnyh osnov organizacii I upravlinnya per-evezennyamy masovyh vantaghiv za uchastyu flotu. avtoref. dis. ... doct. tehn.nauk: 05.22.01], 43.
2. Lapkin O.I., Onyschenko S.P., Koskina Yu.O. (2017). Theory and practice of freight operations [Teoriya I praktyka frahtovyh operaciy], 151.
 3. Onyschenko S.P., Koskina Yu.O. (2015). Study of the influence of the terms of the offer on the success of concluding a freight agreement. [Doslidghennya vplyvu umov oferty na uspishnist ukladannya frahtovoi ugodu] Eastern European journal of advanced technologies, 6/3 (78), 25–32.
 4. Sotnichenko L.L. (2017). Establishing directions for the development of the freight market of the bulk fleet[Vstanovlennya napryamkiv rozvytku frahtovogo runku balkernogo flotu]. Bulletin of the Azov State Technical University, 33, 203–209.
 5. Onyschenko S.P., Koskina Yu.O. (2018). Ensuring the given level of the voyage efficiency considering the risks factors associated with the charter party terms. Bulletin ASTU. Series: Technical sciences, 37, 192–201.
 6. Onyschenko S.P., Koskina Yu.O. (2018). Factors determining a freight rate level. The Current Stage Of Scientific And Technological Progress'. Conference proceedings. March 27–28, 2018. Karlsruhe, Germany, 43–45.
 7. S&P Global Platts Dry Freight Wire Issue 25 February 5 2021. (2021, 05 February). https://f.hubspotusercontent30.net/hubfs/9030380/Platts_DryFreightWire_2021.pdf
 8. Glogos greight report week 5 2021. (2021). <http://glogos.net/wp-content/uploads/2021/02/Glogos-Freight-Report-Week-5.pdf>
 9. Cahier des Tarifs de l'ANP. (dateless). <https://www.anp.org.ma/fr/espace-professionnel/cahierdestarifs>
 10. Seaport Manatee authority port tarrifs. (dateless). <https://www.seaportmanatee.com/business/finance/>
 11. Turkish straits calculator. (dateless). <https://lethagencies.com/turkish-straits/calculator-turkish-straits>
 12. Freight rates weekly report 2021. (dateless). <https://globalmaritimehub.com/wp-content/uploads/2021/02/Weekly-Report-Week-6-2021.pdf>

МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 008.5

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.16>

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ПРОЕКТНО-ОРІЄНТОВАНОГО УПРАВЛІННЯ В СУДНОПЛАВСТВІ ЯК ОСНОВИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ

Ю. В. Бичковський

ст. викладач кафедри «Навігація та керування судном»

Одеський національний морський університет

ORCID ID: 0000-0003-1459-9029

Анотація

Вступ. Ризики є постійним супутнім елементом у судноплаванні. Проектний підхід передбачає все розмаїття ризиків розглядати інтегрально, що формує цілісний погляд на можливі негативні ситуації в процесі виконання рейсу, що є ще одним фактором в обґрунтуванні доцільності використання проектно-орієнтованого управління в судноплаванні. Така інтеграція дає змогу врахувати вплив будь-якого виду ризику і ситуацій ризику, які виникають під час виконання проекту, на підсумковий результат проекту. **Результати.** У даному дослідженні пропонуються основні положення організації проектно-орієнтованого управління в судноплаванні. Обґрунтовано правочинність застосування проектно-орієнтованого підходу, відповідно до методології проектного менеджменту визначено сутність та види проектів у рамках операційної діяльності судноплавних компаній. Подано два варіанти розгляду меж проекту та обґрунтовано розгляд проектів як розуміння рейсу (або контракту) в широкому розумінні цього слова – з огляду на процес організації та управління виконанням фрахтового контакту з переміщення вантажу з порту А в порт Б (в рамках якого і здійснюється переміщення вантажу з порту А в порт Б). У цьому випадку межі проекту ширші й охоплюють процес підготовки фрахтового договору та аналіз результатів його виконання. Такий підхід є універсальним для проектно-орієнтованого підходу в судноплаванні та може слугувати основою для формування проектного підходу для будь-яких варіантів роботи суден у рамках будь-яких варіантів фрахтових контрактів і торкатися будь-яких аспектів, пов'язаних із судноплаванням: технічних, екологічних, комерційних і т.д. Визначено сутність основних етапів життєвого циклу даної категорії проектів, а також складові успіху проектів. Обґрунтовано, що «безпека» є одним з показників успіху проектів.

Висновки. Проектно-орієнтований підхід до управління в судноплаванні дає змогу здійснити синтез різноманітних методів, підходів до оцінювання та забезпечення безпеки традиційно прийнятих або впроваджуваних на базі рекомендацій ІМВ у судноплаванні і методів управління ризиками в управлінні проектами. Так інтеграція найкращих практик мінімізації ризиків у судноплаванні в контексті безпеки та мінімізації ризиків у рамках проектно-орієнтованої методології формує новий

ефективний з погляду результативності підхід до забезпечення безпеки судноплавства. Наведені результати складають базу для подальшого дослідження питань забезпечення безпеки в рамках проектно-орієнтованого підходу до управління в судноплавстві.

Ключові слова: проект, безпека, управління, життєвий цикл, судноплавство, успіх проекту.

PROJECT-ORIENTED MANAGEMENT IN SHIPPING AS A BASIS FOR ENSURING SAFETY

Y.V. Bychkovsky

Senior lecturer of the department «Navigation & ship handling»
Odesa National Maritime University
ORCID ID: 0000-0003-1459-9029

Summary

Introduction. Risks are a constant accompanying element in the shipping. The project approach involves considering all the variety of risks in an integral manner, that forms a holistic view of possible negative situations during the voyage, which is another factor in justifying the feasibility of using project-oriented management in shipping. Such integration makes it possible to take into account the impact of any type of risk and risk situations arising during the project on the final result of the project. Results. In this study, the main provisions of the project-oriented management in shipping are proposed. The legality of the application of the project-oriented approach is substantiated, in accordance with the methodology of project management, the essence and types of projects within the operational activities of shipping companies are determined. Two options for consideration of the boundaries of the project are presented and the consideration of projects as an understanding of the voyage (or contract) in the broad sense is justified – in view of the process of organizing and managing the execution of the freight contact for the movement of cargo from port A to port B. In this case, the boundaries of the project are wider and include the process of preparing the freight contract and the analysis of the results of its realization. This approach is universal for a project-oriented management in shipping and forms a basis for the a project approach for any options for the ships operation under any freight contracts and considers all aspects related to the shipping: technical, environmental, commercial, etc. The essence of the main stages of the life cycle for this category of projects, as well as the components of the project success, have been determined. It is substantiated that "safety" is one of the indicators of the success of projects.

Conclusions. A project-oriented approach to management in shipping makes it possible to synthesize various methods and approaches to assessment and safety assurance traditionally adopted or implemented on the basis of IMO recommendations in shipping and risk management methods in project management. Thus, the integration of the best practices of risk minimization in shipping in the context of safety and risk minimization within the project methodology forms a new effective approach to ensuring the safety of shipping. The presented results form the basis for further research on safety issues within the project-oriented approach to management in shipping.

Key words: project, safety, management, life cycle, shipping, project success.

Вступ. Проектно-орієнтоване управління є успішною управлінською концепцією, яка розглядає діяльність, що традиційно не є проектною, як таку, причому в різних сферах. Прикладами теоретичних розробок щодо проектно-орієнтованого управління в транспортній сфері, впроваджених і апробованих, можуть бути роботи [1–5].

Розглядаючи операційну діяльність підприємств/організацій як послідовність проектів, акцентується увага на успіху кожного конкретного елемента діяльності – проекту. При цьому оптимізується розподіл ресурсів, децентралізується управління, всі бізнес-процеси узгоджуються в прив'язці до конкретного проекту. Такий підхід забезпечує ефективність кожного структурного елемента діяльності – проекту, а не ефективність діяльності "в середньому", що призводить до підвищення ефективності діяльності підприємств/організацій [2].

Постановка проблеми. Судноплавство є сферою, де традиційно реалізовувалися проекти і програми [6], тому в останні десятиліття методологія, що набула значного розвитку, та відповідні методи управління проектами і програмами, що знайшли своє відображення і в роботах, пов'язаних із управлінням проектами і програмами будівництва суден та поповнення флоту [7, 8], ремонту суден [9], а також інвестиційними проектами придбання суден, і лізинговими проектами в судноплавстві. Проте об'єкти, що розглядаються в зазначених роботах, є класичними проектами і традиційно розглядалися як проекти або програми. Операційна ж діяльність судноплавних компаній, робота суден та інші аспекти, пов'язані із судноплавством, не були об'єктом досліджень у рамках проектно-орієнтованого підходу, хоча послуги з транспортування і доставки вантажів розглядали як проекти в роботах [2, 3]. Таким чином, розвитком і розширенням сфери застосування проектно-орієнтованого підходу є формування основних положень проектно-орієнтованого управління в судноплавстві.

Зазначимо, що ризики є постійним супутнім елементом у судноплавстві та цій тематиці присвячена достатня кількість публікацій. Ці ризики різноманітні [10] і кожен вид ризику розглядають у межах окремих аспектів управління в традиційному підході до управління. Так, комерційні ризики пов'язані з потенційною загрозою зменшення ефективності роботи суден, виробничі ризики [2] виникають під впливом різноманітних негативних чинників технічного характеру, а також впливу погодних умов у процесі виконання рейсу, що призводить до відхилень у ключових показників (елементів часу рейсу, наприклад), а це також визначає потенційно можливе зменшення ефективності. Технічні ризики пов'язані з відмовою судових систем і можливими аваріями. Ризики, пов'язані з людським елементом, виникають унаслідок впливу індивідуальних чинників членів екіпажу (як людського елемента в судноплавстві) на технічний стан судна (працездатність усіх систем), виконання операцій та ухвалення рішень у різних ситуаціях [11].

Проектний підхід передбачає все розмаїття ризиків розглядати інтегрально, що формує цілісний погляд на можливі негативні ситуації в процесі виконання рейсу, що є ще одним фактором в обґрунтуванні доцільності використання проектно-орієнтованого управління в судноплавстві. Таким чином, ризики "прив'язуються" до конкретного проекту, і вже "всередині проекту" розподіляються на різні види, але контроль за ними здійснюється в рамках єдиної системи [12]. Така інтеграція дає

змогу врахувати вплив будь-якого виду ризику і ситуацій ризику, які виникають під час виконання проекту, на підсумковий результат проекту.

Ціль статті. Тому метою даного дослідження є формування базових положень проектно-орієнтованого управління в судноплаванні, що є основою для подальших розробок методів та засобів забезпечення безпеки.

Результати. Зазначимо, що проектно-орієнтований підхід до управління в судноплаванні дає змогу здійснити синтез різноманітних методів, підходів до оцінювання та забезпечення безпеки (традиційно прийнятих або впроваджуваних на базі рекомендацій ІМВ у судноплаванні [11]) і методів управління ризиками, яких теоретична база управління проектами накопичила достатню кількість, та їхній розвиток продовжується й донині. Таким чином, інтеграція найкращих практик мінімізації ризиків у судноплаванні в контексті безпеки та мінімізації ризиків у рамках проектно-методології формує новий ефективний з погляду результативності підхід до забезпечення безпеки судноплавання (рис. 1).

Сучасний світ пов'язаний із процесами конвергенції в науці – зближуються та інтегруються різні методології, що породжує нові ефективні методології та інструменти [13]. Управління проектами якраз є методологією, яка більше за всі інші методології схильна до процесів конвергенції, і наведені вище міркування підтверджують цей факт і є ще одним прикладом конвергенції.

Отже, забезпечення безпеки судноплавання є невід'ємним елементом діяльності як судноплавних компаній, так і судноплавної сфери загалом на рівні міжнародних організацій, наприклад, таких як ІМО. Підвищення результативності відповідних заходів може забезпечуватися також завдяки проектно-орієнтованому підходу на різних рівнях. У цьому дослідженні увагу зосереджено на діяльності із



Рис. 1. Конвергенція інструментів управління ризиками в проектному менеджменті та методів оцінки ризиків у контексті безпеки в судноплаванні

забезпечення безпеки на рівні конкретної компанії та судна. Первинною теоретичною базою для формування та впровадження проектно-орієнтованого управління є визначення базових положень проектно-орієнтованого підходу – встановлення сутності проектів, ідентифікації їхньої цінності, успіху.

Згідно з класичним визначенням, проект – тимчасове підприємство, спрямоване на створення унікального продукту, послуги або результату. Тимчасовість – будь-який проект має чіткі часові рамки (це не стосується його результатів). Унікальні продукти, послуги, результати – проект має породжувати унікальні результати, досягнення, продукти. Послідовне розроблення – будь-який проект розвивається в часі, проходячи через визначені раніше етапи або кроки.

Судноплавство – широкий термін, що охоплює перевезення вантажів/пасажирів водним транспортом, що є сутністю роботи суден. Зазначимо, що в рамках цього дослідження пасажирські перевезення не розглядаються, хоча пропонувані результати можуть бути розширені і на цю сферу. Продуктом роботи суден є переміщення вантажів. У рамках судноплавства можна також виокремити й різні заходи, наприклад, ІМО, щодо впровадження різних конвенцій, що також утворює відповідний проект, який є проектом у класичному розумінні та тягне за собою необхідність реалізації відповідних проектів на рівні прапора та окремих судовласників. Таким чином, проектами для судноплавства в контексті забезпечення безпеки в рамках проектно-орієнтованого підходу є саме проекти, пов'язані з роботою суден.

Безпека судноплавства є станом збереження (захищеності) людського здоров'я та життя, довкілля та майна на морі та на внутрішніх водних шляхах; відсутністю неприпустимого ризику, пов'язаного із загибеллю або травмуванням людей, заподіянням шкоди навколишньому середовищу або матеріальних збитків [11]. Згідно з [10] запорукою безпечної експлуатації судна є розуміння і виконання співробітниками компаній (як берегового, так і судового персоналу) основ безпеки мореплавства і захисту навколишнього середовища, тобто комплексу конструктивних, технічних, організаційних заходів і відповідної підготовки судового і берегового персоналу. Саме порядок виконання цього комплексу і передбачений Міжнародним кодексом з управління безпечною експлуатацією суден і попередженням забруднення 1993 року.

Таким чином, заходи щодо забезпечення безпеки судноплавства є багаторівневими – міжнародними, національними, а також реалізуються на рівні конкретних компаній (рис. 2).

Забезпечення безпеки судноплавства на рівні конкретної компанії можна представити у вигляді такої схеми (рис. 3).

Робота суден – тобто виконання транспортної роботи (перевезення вантажів) – має забезпечувати економічну ефективність як загалом по флоту судноплавної компанії, так і для кожного конкретного судна, причому ефективність має забезпечуватися і на рівні конкретного рейсу, і загалом за проміжок часу, який ми розглядаємо (зазвичай, рік або термін контракту, якщо цей термін менший, ніж рік: наприклад, судно може бути орендоване в тайм-чартер на пів року, і тоді відповідальність за дотримання заходів безпеки несуть обидві сторони). Поряд з економічною ефективністю, судна і флот загалом мають забезпечувати безпеку

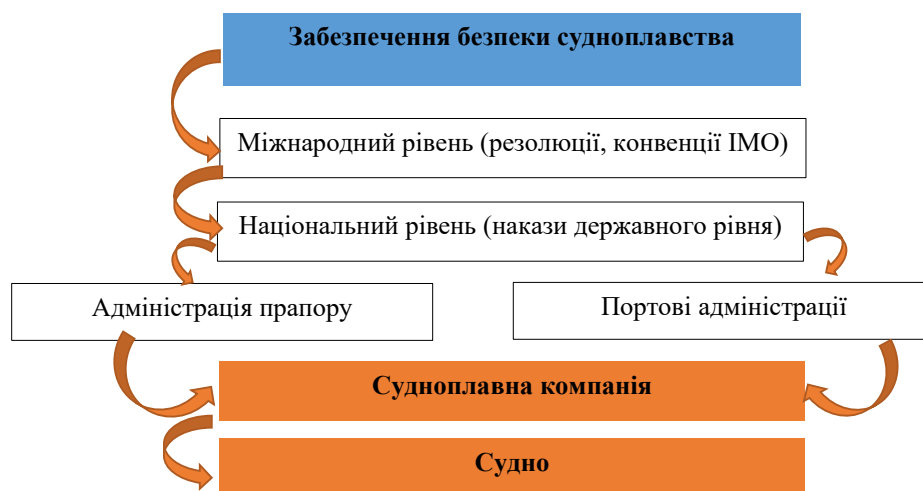


Рис. 2. Рівні заходів по забезпеченню безпеки судноплавства

судноплавства як на рівні конкретного рейсу, так і загалом за період експлуатації. Можна стверджувати, що відповідно до сучасних стандартів і норм, робота суден має бути ефективною і безпечною (у контекстах, зазначених вище).

Таким чином, проектно-орієнтований розгляд забезпечення безпеки судноплавства на рівні конкретної компанії корелює з проектно-орієнтованим підходом до управління роботою суден.

Проектом за проектно-орієнтованим підходом до роботи суден мають бути її відповідні утворювальні "одиниці" різного ступеня агрегованості, якими є рейс або довгостроковий контракт (якщо йдеться про довгострокові фрахтові контракти – contract of affreightment, COA) у трамповому судноплавстві, або рейс у межах лінійного сервісу в лінійному судноплавстві (рис. 4). Крім того, судна працюють, обслуговуючи проектні вантажі [1], що також формує специфічний проект у рамках проекту (наприклад, розроблення морського родовища газу). Щодо останнього, то незалежно від того, чи виконує транспортні роботи субпідрядник, чи безпосередньо команда проекту, розгляд транспортного обслуговування у вигляді проекту є коректним і може відноситися до різних рівнів менеджменту.

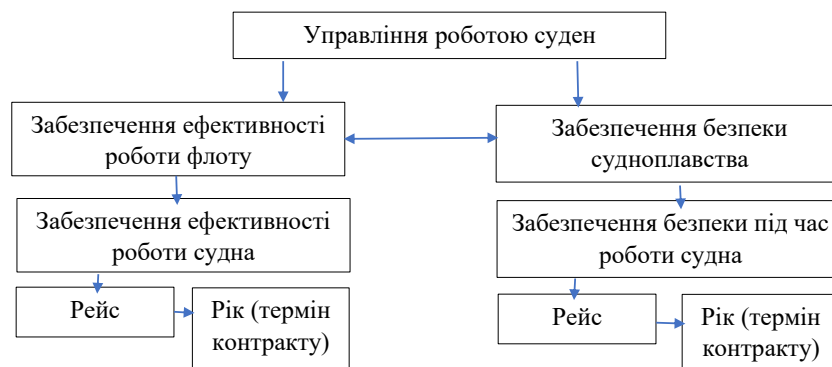


Рис. 3. Забезпечення безпеки судноплавства на рівні конкретної компанії

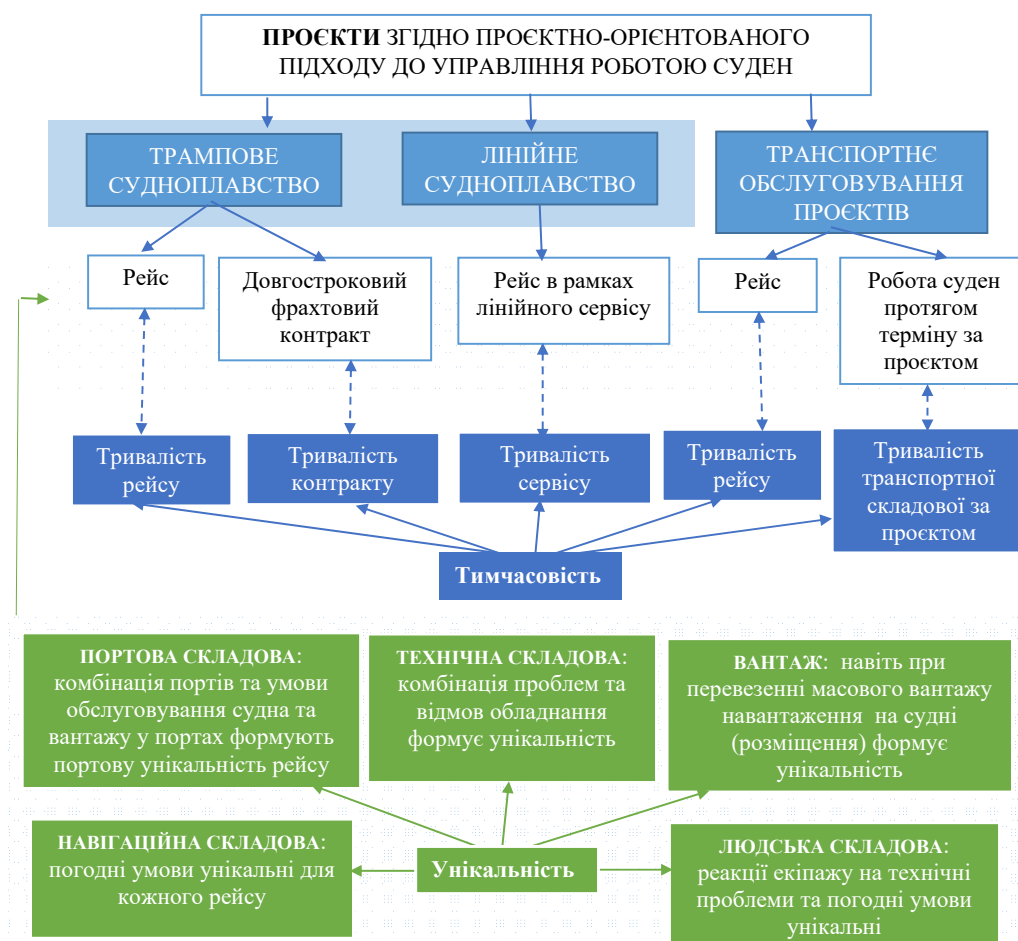


Рис. 4. Проекти в рамках проектно-орієнтованого управління роботою суден

З урахуванням того, що "проект" має відповідати основним умовам – тимчасовості, унікальності та обмеженості ресурсів, то ці позиції потребують обґрунтування для кожного представленого на рис. 4 виду проекту в суднопластві в рамках проектно-орієнтованого управління.

Ресурсами для цих проектів є: екіпажі (склад обмежений характеристиками судна), паливо (обмежене можливостями постачальників і фінансовими ресурсами) тощо. Обмеженість у часі визначається тривалістю рейсів, сервісів або контрактів для трампового і лінійного суднопластва, що визначається відповідними контрактами на постачання товарів. Унікальність формується для всіх встановлених проектів на базі сукупності унікальності навігаційних умов (природно-кліматичних); портового обслуговування (включно з погодними факторами, військово-політичними, технологічними та людськими); унікальності ситуацій, пов'язаних із обладнанням судна (помилки, відмови, поломки, аварії тощо); унікальності вантажу – навіть при перевезенні масових вантажів (зерна, наприклад) умови завантаження, умови завантаження, якість вантажу тощо можуть бути тільки умовно прийняті як "стандартні".

І, природно, людський елемент – один і той самий екіпаж, на конкретному судні, в "однакових", з погляду портів переходу, рейсах може ухвалювати різні

рішення в подібних ситуаціях. Крім того, емоційна складова, стан здоров'я кожного члена екіпажу є різними, що в кожному конкретному рейсі формує "унікальність" одного й того самого за складом екіпажу.

Наведені вище міркування дають змогу стверджувати, що розглядуваним елементам роботи суден притаманні всі ознаки проекту, і це дає змогу цю діяльність розглядати в рамках проектно-орієнтованого підходу. З урахуванням невід'ємності від роботи суден, забезпечення безпеки судноплавства також правомірна розглядати з погляду проектно-орієнтованого підходу.

Тривалість встановлених вище проектів варіюється від досить короткого рейсу (до 10 днів) до тривалих рейсів (до майже 3 місяців, наприклад, для деяких лінійних сервісів Азія-Європа), і до річного фрахтового контракту.

Важливим атрибутом проекту є його життєвий цикл, який для проектно-орієнтованого підходу до управління діяльністю компаній має певну специфіку. Тож охарактеризуємо сутність етапів життєвого циклу проектів у рамках проектно-орієнтованого підходу до управління в судноплавстві. Тут слід наголосити на одному аспекті, від якого принципово залежить структура життєвого циклу та склад команди проекту, – що конкретно вважати рейсом чи роботою за фрахтовим контрактом, тобто з якого рівня дивитися на роботу суден як на сукупність проектів (рис. 5), причому це характерно для практичних видів діяльності, яку планують розглядати в межах проектно-орієнтованого підходу, а не лише в судноплавстві.

Тут можливі два варіанти:

1) розгляд як рейсу власне рейсу морського судна – переміщення вантажу на судні з порту А в порт Б. Таким чином, початок життєвого циклу судна – постановка судна до причалу під навантаження в порту А, закінчення життєвого циклу – закінчення вивантаження вантажу в порту призначення Б. У такому разі рівень



Рис. 5. Два погляди на проектно-орієнтований розгляд роботи суден

розгляду роботи судна – саме судно, і в цьому разі команда проекту – це офіцерський склад екіпажу (капітан, старпом, старший механік тощо), який і керує цим проектом. Аналогічна інтерпретація можлива і для річного фрахтового контракту;

2) розуміння рейсу (або контракту) в широкому розумінні цього слова – з огляду на процес організації та управління виконанням фрахтового контакту з переміщення вантажу з порту А в порт Б (в рамках якого і здійснюється переміщення вантажу з порту А в порт Б). У цьому випадку межі проекту ширші й охоплюють процес підготовки фрахтового договору та аналіз результатів його виконання. Команда проекту в цьому випадку – це менеджмент судноплавної (операторської) компанії – фахівці комерційного відділу, технічного менеджменту тощо і командний склад екіпажу судна. При цьому "рейс" у вузькому розумінні цього слова є аналогом експлуатаційної фази проекту в класичному розумінні його життєвого циклу.

Таким чином – рівень "погляду" на проект і операційну діяльність у рамках проектно-орієнтованого підходу визначає межі проектів, сутність етапів їхнього життєвого циклу, а також склад команди проекту.

Зазначимо, що кожен із розглянутих вище варіантів є обґрунтованим і має право на існування. У цьому дослідженні за розуміння меж проекту приймається другий варіант, оскільки він є універсальним для проектно-орієнтованого підходу в судноплаванні та може слугувати основою для формування проектного підходу для будь-яких варіантів роботи суден у рамках будь-яких варіантів фрахтових контрактів і торкатися будь-яких аспектів, пов'язаних із судноплаванням: технічних, екологічних, комерційних і т.д.

Другою причиною є те, що це дослідження зосереджене на питаннях безпеки судноплавання, відповідальність за яку несе і менеджмент, і командний склад судна, а організаційні заходи мають зніщуватися і управлятися на рівні компанії. Таким чином, межі проектів у рамках проектно-орієнтованого підходу до судноплавання формуються від початку укладення контракту до угоди про його виконання.

З урахуванням прийнятих меж проекту основні етапи життєвого циклу проекту та їхню сутність подано на рис. 6.

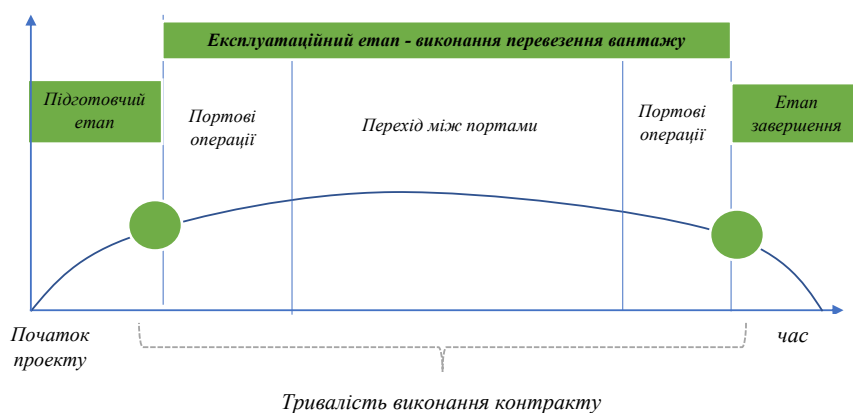


Рис. 6. Сутність основних етапів життєвого циклу проектів у рамках проектно-орієнтованого управління в судноплаванні

Продуктом проекту є те, що виникає в результаті його реалізації. Результатом реалізації цієї категорії проектів є фізичне переміщення вантажів відповідно до заданих умов. Для судноплавної компанії цінність цього "продукту" – економічний результат, оскільки розглянуті категорії проектів є комерційними. Як показник, що характеризує цінність пропонується використовувати прийнятий у судноплаванні тайм-чартерний еквівалент ТСЕ (дол./добу).

Однією з ключових характеристик проектів є "успіх". Згідно з прийнятим підходом [2–5, 13], проект успішний, якщо його реалізовано у встановлені терміни, у межах запланованого бюджету та із заданими результатами. У даному випадку, як результати виступають економічні показники – для судна це тайм-чартерний еквівалент і забезпечення безпеки з урахуванням двох основних аспектів роботи суден (рис. 7). Економічна ефективність – це мета, а безпека в усіх її аспектах – обов'язкова умова.

Зазначимо, що порушення безпеки в будь-яких масштабах призводить до недосягнення успіху проекту в судноплаванні. Природно, що під час реалізації проектів (роботи суден) виникають ситуації ризику, за яких, зокрема, виникає загроза безпеці. Проте проект вважатиметься успішним, якщо відсутні наслідки порушення безпеки.

Невизначеність супроводжує судноплавання і потенційно впливає на кожну складову успіху. Основними складовими невизначеності є дві групи чинників – зовнішні та внутрішні.

В даному випадку до зовнішніх належать економічні, природно-кліматичні, а також вплив суб'єктів, пов'язаних з обслуговуванням судна, а також інші суб'єкти,

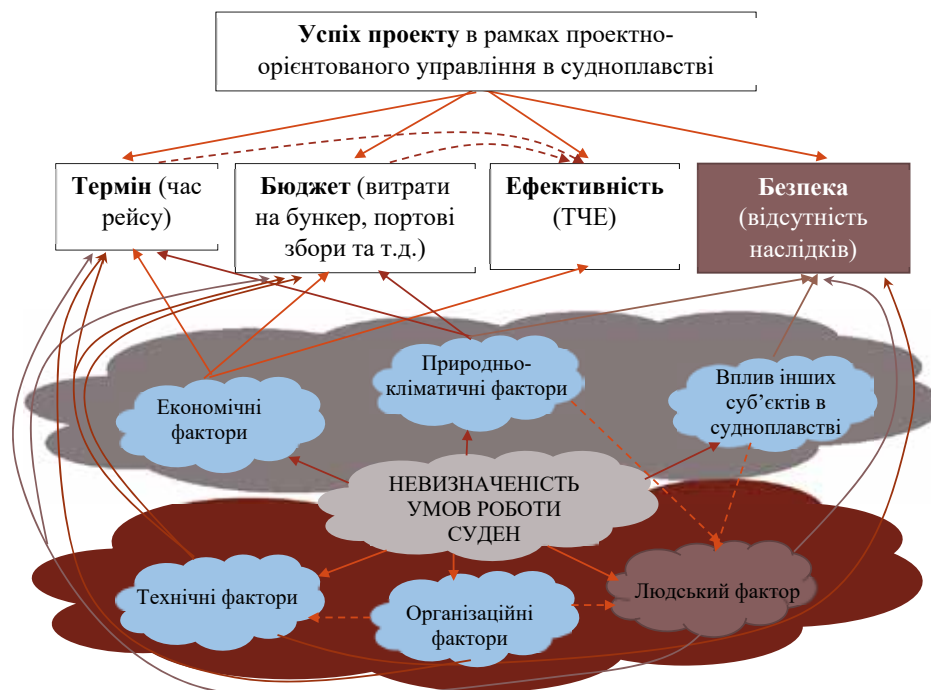


Рис. 7. Вплив невизначеності на успіх проекту в рамках проектно-орієнтованого управління в судноплаванні

що можуть впливати на проект. Наприклад, екіпаж іншого судна в процесі маневрів судна в порту, або в процесі проходження судна з порту в порт може бути причинами аварії суден або аварійних ситуацій, що загрожують безпеці, або тягнуть за собою затримку судна в порту і, як наслідок, збільшення тривалості експлуатаційної фази проекту.

До внутрішніх чинників, які є причинами невизначеності, належать технічні, організаційні та людські. Технічні чинники пов'язані зі станом судна і всіх його систем. У кожному рейсі – у кожному проекті – потенційно можлива відмова систем або поломки судна, які загрожують безпеці або формують додаткові витрати, включно зі збільшенням часу рейсу. Організаційний фактор проявляється на рівні менеджменту судноплавної компанії (наприклад, помилки під час планування рейсу та організації обслуговування судна в портах). Людський елемент проявляється на рівні екіпажу судна (наприклад, неправильне ухвалення рішення за поганих погодних умов, або помилки під час вантажних операцій судна в порту).

Висновки. Таким чином у даному дослідженні пропонуються основні положення організації проектно-орієнтованого управління в суднопластві. Обґрунтовано правочинність застосування проектно-орієнтованого підходу, відповідно до методології проектного менеджменту визначено сутність та види проектів у рамках операційної діяльності судноплавних компаній. Подано два варіанти розгляду меж проекту та обґрунтовано розгляд проектів як розуміння рейсу (або контракту) в широкому розумінні цього слова – з огляду на процес організації та управління виконанням фрахтового контакту з переміщення вантажу з порту А в порт Б (в рамках якого і здійснюється переміщення вантажу з порту А в порт Б). У цьому випадку межі проекту ширші й охоплюють процес підготовки фрахтового договору та аналіз результатів його виконання. Такий підхід є універсальним для проектно-орієнтованого підходу в суднопластві та може слугувати основою для формування проектного підходу для будь-яких варіантів роботи суден у рамках будь-яких варіантів фрахтових контрактів і торкатися будь-яких аспектів, пов'язаних із судноплаством: технічних, екологічних, комерційних і т.д.

Визначено сутність основних етапів життєвого циклу даної категорії проектів, а також складові успіху проектів. Обґрунтовано, що «безпека» є одним з показників успіху проектів, а специфікою проектів у проектно-орієнтованому суднопластві є те, що безпека, а точніше, відсутність наслідків її порушення є обов'язковою складовою успіху.

Все це складає базу для подальшого дослідження питань забезпечення безпеки в рамках проектно-орієнтованого підходу до управління в суднопластві.

ЛІТЕРАТУРА

1. Павлова Н.Л., Онищенко С.П. Організація проектно-орієнтованого управління транспортною компанією (на прикладі транспортно-експедиторської компанії). *Управління розвитком складних систем*. 2020. №42. С.23–28. doi: 10.32347/2412-9933.2020.42.23-28
2. Pavlova N., Onyshchenko S., Obronova A., Chebanova T., Andriievskaya V. Creating the Agile Model to Manage the Activities of Project Oriented Transport Companies. *Eastern-European Journal*

- of Enterprise Technologies*. 2021. № 1(3) (109). С. 51–59. doi: 10.15587/1729-4061.2021.225529
3. Rusanova S., Onyshchenko S., Piterska V. Modelling the Project Transport Support Optimal Option. *Technology audit and production reserves*. 2021. № 1 (2 (57)). С. 43–48. doi: 10.15587/2706-5448.2021.225288
 4. Bondar A., Andrievska V., Onyshchenko S. Identification of creation and development projects of logistic systems. *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті*. 2019. №. 69 (4). С. 26–37. doi: 10.31375/2226-1915-2019-4-26-37
 5. 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*. 2020. № 1(2 (51)). С. 24–29. doi: 10.15587/2312-8372.2020.198373
 6. Lapkina I., Prykhno Y., Lapkin O. Content optimization of the development of multi-project of a shipping company. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 2(3). С. 104–116. doi: 10.15587/1729-4061.2020.199477
 7. Lapkina I., Malaksiano M., Savchenko Y. Design and optimization of maritime transport infrastructure projects based on simulation modeling methods. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. P. 36–45.
 8. Немчук О.О., Верещака М.А., Онищенко С.П. Сутність та специфіка інфраструктурних проєктів на водному транспорті. *Розвиток транспорту*. 2021. № (1 (8)). С. 135–148. doi: 10.33082/td.2021.1-8.13
 9. Шумило О.М., Россомаха О.І., Шахов А.В. Удосконалення моделі визначення вартості життєвого циклу судна. *Розвиток транспорту*. 2021. № (1 (8)). С. 113–124. doi: 10.33082/td.2021.1-8.11
 10. Melnyk O., Bychkovsky Yu., Shumylo O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Voloshyn A., Cheredarchuk N. Study of the risk assessment quality dependence on the ships accidents analysis. *Scientific Bulletin of Naval Academy*. 2022. Vol. XXV. P. 136–146. doi: 10.21279/1454-864X-22-11-015
 11. Бичковський Ю.В., Мельник О.М. Сучасна методика оцінки рівню безпеки судна та шляхи його підвищення. *Розвиток транспорту*. 2021. № 2 (9). С. 37–46. doi: 10.33082/td.2021.2-9.03
 12. Bondar A., Bushuyev S., Bushuieva V., Onyshchenko S. Complementary strategic model for managing entropy of the organization; *Proceedings of the 2nd International Workshop IT Project Management (ITPM 2021) Slavsko, Lviv region, Ukraine, February 16-18, 2021. CEUR Workshop Proceedings*, P. 285–302. <http://ceur-ws.org/Vol-2851/paper27.pdf>
 13. Bushuyev S., Onyshchenko S., Bushuyeva N., Bondar A. Modelling projects portfolio structure dynamics of the organization development with a resistance of information entropy. *2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), LVIV, Ukraine*. 2021. P. 293–298. doi: 10.1109/CSIT52700.2021.9648713

REFERENCES

1. Pavlova N., Onyshchenko S. (2020). Organization of transport company's project-oriented management (on the example of the freight forwarding company) [Orhanizatsiya proyektno-oriyentovanoho upravlinnya transportnoy kompaniyeyu (na prykladi transportno-ekspedytors'koyi kompaniyi)]. *Management of Development of Complex Systems*, 42, 23–28. doi: 10.32347/2412-9933.2020.42.23-28 [in Ukrainian].
2. Pavlova N., Onyshchenko S., Obronova A., Chebanova T., Andriievska V. (2021) Creating the Agile Model to Manage the Activities of Project Oriented Transport Companies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(3 (109)), 51–59, 2021 doi: 10.15587/1729-4061.2021.225529
3. Rusanova S., Onyshchenko S., Piterska V. (2021) Modelling the Project Transport Support Optimal Option. *Technology audit and production reserves*, 1 (2 (57)), 43–48. doi: 10.15587/2706-5448.2021.225288
4. Bondar A., Andrievska V., Onyshchenko S. (2019) Identification of creation and development projects of logistic systems, *Development of management and entrepreneurship methods on transport*, 69 (4), 26–37. doi: 10.31375/2226-1915-2019-4-26-37
5. 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)), 24–29. doi: 10.15587/2312-8372.2020.198373
6. Lapkina, I., Prykhno, Y., & Lapkin, O. (2020). Content optimization of the development of multi-project of a shipping company. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(3), 104. doi: 10.15587/1729-4061.2020.199477
7. Lapkina I., Malaksiano M., Savchenko, Y. (2020). Design and optimization of maritime transport infrastructure projects based on simulation modeling methods. In *CEUR Workshop Proceedings* (pp. 36–45).
8. Nemchuk O.O., Vereshchaka M.A., Onyshchenko S.P. (2021). The essence and specifics of infrastructure projects on water transport [Sutnist' ta spetsyfika infrastrukturykh proyektiv na vodnomu transporti] *Transport development*, (1 (8)), 135–148. doi: 10.33082/td.2021.1-8.13 [in Ukrainian].
9. Shumylo O. M., Rossomakha O. I., Shakhov A. V. (2021). Improvement of the model for determining the cost of the ship's life cycle [Udoskonalennya modeli vyznachennya vartosti zhyttyevoho tsykladu sudna] *Transport development*, (1 (8)), 113–124. doi: 10.33082/td.2021.1-8.11 [in Ukrainian].
10. Melnyk O., Bychkovsky Yu., Shumylo O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Voloshyn A., Cheredarchuk N. (2022) Study of the risk assessment quality dependence on the ships accidents analysis. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, Vol. XXV, 136–146. doi: 10.21279/1454-864X-22-11-015

11. Bychkovsky Y., Melnyk O. (2021) Modern methods of ship safety level assessment and ways of its improvement [Suchasna metodyka otsinky rivnyu bezpeky sudna ta shlyakhy yoho pidvyschenny]. *Transport development*, 2 (9), doi: 10.33082/td.2021.2-9.03 [in Ukrainian].
12. Bondar A., Bushuyev S., Bushuieva V., Onyshchenko S. (2021) Complementary strategic model for managing entropy of the organization; Proceedings of the 2nd International Workshop IT Project Management (ITPM 2021) Slavsko, Lviv region, Ukraine, February 16–18, 2021. *CEUR Workshop Proceedings*, 285–302. <http://ceur-ws.org/Vol-2851/paper27.pdf>
13. Bushuyev S., Onyshchenko S., Bushuyeva N., Bondar A. (2021) Modelling projects portfolio structure dynamics of the organization development with a resistance of information entropy. 2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), LVIV, Ukraine, 293–298, doi:10.1109/CSIT52700.2021.9648713

Наукове видання

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

Випуск 1(16), 2023

Засновник – Одеський національний морський університет

*Українською
та англійською мовами*

Видається з жовтня 2016 р.

Формат 70×108/16. Гарнітура Times New Roman.
Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 18,46.
Замов. № 0423/227. Наклад 200 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.

Scientific publication

TRANSPORT DEVELOPMENT

Scientific journal

Issue 1(16), 2023

Founded by Odessa National Maritime University

In Ukrainian and English

Since October 2016

Format 70×108/16. Times New Roman Font.
Offset. Digital printing. Conventional printed sheet 17,33.
Order No 0423/227. Edition of 200 copies.

Publishing House “Helvetica”
65101, Ukraine, Odessa, 6/1 Inglizi St.
Phone: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Certificate of publishing entity
ДК № 7623 as of 22.06.2022