

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКИЙ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

# РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

*Науковий журнал*

**ВИПУСК 2(29), 2026**

*Заснований у жовтні 2016 року*



Видавничий дім  
«Гельветика»  
2026

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

№ 2(29)  
2026

Заснований у жовтні 2016 року

Виходить 4 рази на рік

Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа:  
Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення  
№ 1547 від 09.05.2024 року. Ідентифікатор медіа: R30-04557

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Одеський національний морський університет  
(вул. Мечникова, буд. 34, м. Одеса, 65029, priem@onmu.org.ua, тел. +38(048)732-23-05)

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»):  
С1 Економіка, D3 Менеджмент, D6 Секретарська та офісна справа, G11 Машинобудування  
(за спеціалізаціями), J5 Морський та внутрішній водний транспорт, J6 Авіаційний транспорт,  
J7 Залізничний транспорт, J8 Автомобільний транспорт

**Засновник:**

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

**Редакційна колегія:**

Головний редактор – Мінчев Дмитро Степанович  
доктор технічних наук, доцент, професор кафедри суднових енергетичних систем та комплексів,  
Одеський національний морський університет, Україна

**Члени редакційної колегії:**

*Варбанець Роман Анатолійович*, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри суднових енергетичних систем та комплексів, Одеський національний морський університет, Україна  
*Мельник Олексій Миколайович*, доктор технічних наук, професор, професор кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Україна  
*Малаксіано Микола Олександрович*, доктор технічних наук, професор, професор кафедри технічної кібернетики й інформаційних технологій ім. проф. Р.В. Меркта, Одеський національний морський університет, Україна  
*Кириллова Олена Вікторівна*, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри експлуатації портів і технологій вантажних робіт, Одеський національний морський університет, Україна  
*Пітерська Варвара Михайлівна*, доктор технічних наук, професор, професор кафедри експлуатації портів і технологій вантажних робіт, Одеський національний морський університет, Україна

*Збігнев Корчевський (Zbigniew Korczewski)*, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри суднових енергетичних установок, Гданський технологічний університет, Республіка Польща  
*Вацлав Піштек (Václav Píštěk)*, доктор технічних наук, професор, професор факультету машинобудування Інституту автомобільної інженерії, Технологічний університет Брно, Чеська Республіка  
*Серджан Вуйич (Srdjan Vujić)*, доктор філософії, доцент, завідувач кафедри суднових енергетичних установок, Університет Дубровника, Республіка Хорватія  
*Митрофанов Олександр Сергійович*, доктор технічних наук, професор, професор кафедри двигунів внутрішнього згоряння, установок та технічної експлуатації, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна  
*Коробко Володимир Владиславович*, доктор технічних наук, професор, професор кафедри експлуатації СЕУ та теплоенергетики, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна  
*Пуздrowsька Патриція (Puzdrowska Patrycja)*, PhD, доцент, доцент кафедри суднових енергетичних установок, Гданський технологічний університет, Республіка Польща

Рецензенти: д.т.н. Мельник О.М., к.т.н. Дрожжин О.Л., д.т.н. Головань А.І., д.т.н. Холоденко А.М.

Рекомендовано до друку Вченою радою  
Одеського національного морського університету  
(протокол № 16 від 24.06.2026 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 тоєю зору редакційної колегії, не покладають на неї ніяких зобов'язань.  
Передруки і переклади дозволяються лише за згодою автора та редакції.

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

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

ODESA  
NATIONAL MARITIME UNIVERSITY

# TRANSPORT DEVELOPMENT

*Scientific journal*

**ISSUE 2(29), 2026**

*Founded in October 2016*



Publishing House  
"Helvetica"  
2026

ODESA  
NATIONAL MARITIME UNIVERSITY  
TRANSPORT DEVELOPMENT  
SCIENTIFIC JOURNAL

№ 2(29)  
2026

Founded in October 2016

Frequency: four times a year

Registration of Print media entity:  
Decision of the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine  
No. 1547 as of 09.05.2024. Media ID: R30-04557

Media entity – Odessa National Maritime University (Odessa, 65029, Mechnikov Str., 34,  
priem@onmu.org.ua, tel. +38(048)732-23-05)

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”): C1 Economics, D3 Management, D6 Secretarial and Office Management,  
G11 Mechanical Engineering (with specializations), J5 Maritime and Inland Water Transport,  
J6 Air Transport, J7 Railway Transport, J8 Road Transport

Founder:  
Odessa National Maritime University  
Ukraine, 65029, Odessa, 34 Mechnikov Str.

Editorial Board:  
Editor-in Chief: Minchev Dmytro Stepanovych  
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department  
of Ship Energy Systems and Complexes, Odessa National Maritime University, Ukraine

**Editorial Board Members:**

*Varbanets Roman Anatoliiovych*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Ship Energy Systems and Complexes, Odessa National Maritime University, Ukraine  
*Melnyk Oleksii Mykolaiovych*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Navigation and Maritime Safety, Odessa National Maritime University, Ukraine  
*Malaksiano Mykola Oleksandrovych*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technical Cybernetics and Information Technology named after prof. R.V. Merkt, Odessa National Maritime University, Ukraine  
*Kyryllova Olena Viktorivna*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Port Operation and Cargo Operations Technology, Odessa National Maritime University, Ukraine  
*Piterska Varvara Mykhailivna*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Port Operation and Cargo Operations Technology, Odessa National Maritime University, Ukraine

*Zbigniew Korczewski*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Ship Power Plants, Gdansk University of Technology, Republic of Poland  
*Václav Pištěk*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Automotive Engineering, Brno University of Technology, Czech Republic  
*Mytrofanov Oleksandr Serhiiovych*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Internal Combustion Engines, Installations and Technical Operation, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ukraine  
*Korobko Volodymyr Vladyslavovych*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Ship Power Plants Operation and Heat Energy, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ukraine  
*Srdjan Vujicic*, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Ship Power Plants, University of Dubrovnik, Republic of Croatia  
*Puzdrowska Patrycja*, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Marine Power Plants, Gdansk University of Technology, Republic of Poland

Reviewers: DSc (Engineering) Melnyk O.M., Ph.D. (Engineering) Drozhzhyn O.L.,  
DSc (Engineering) Holovan A.I., DSc (Engineering) Kholodenko A.M.

Recommended for printing by the Academic Council of Odessa National Maritime University  
(Minutes No 16 dated June 24, 2026)

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

---

---

**МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ**

**Г.В. Кузнецов**

Вибір матеріалу для теплоакumuлюючих систем енергетичних установок суден на основі інтегральних критеріїв.....7

**D.O. Iakymenkov, O.I. Sagaydak**

Conceptual distributed information system model for ship certificates processing.....21

**ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)**

**О.М. Коробкова, А.О. Гібало, З.С. Коробкова**

Цифровізація митних процесів у системі розвитку міжнародної торгівлі.....43

**A.M. Ibrahim, K.M. Klevtsov**

Assessment of financial and operational risks in maritime multimodal transport in emergency situations.....56

**О.Є. Соколова**

Методичні положення щодо оцінювання мультимодальних ланцюгів доставки вантажів з авіаційною складовою.....72

**O.V. Fomin, O.V. Burlutskyi, V.S. Lisnychiy, I.V. Gunko**

Enhancing vehicle efficiency: high-strength steel selection for improving the load-bearing capacity of the carrying module.....87

**Ю.Ф. Холодний, О.В. Головіна**

Дослідження методів діагностики автомобілів в умовах технічної експлуатації шляхом аналізу електричного обладнання та технічного стану деталей машин.....106

**О.Т. Чернова, Г.М. Кривенко, О.В. Кривенко**

Характеристики підземного сховища газу на різних етапах експлуатації.....120

C O N T E N T S

---

---

**SEA AND INLAND WATER TRANSPORT**

- H.V. Kuznetsov**  
Selection of materials for thermal energy storage systems in marine power plants based on integral criteria.....7
- D.O. Iakymenkov, O.I. Sagaydak**  
Conceptual distributed information system model for ship certificates processing.....21

**TRANSPORT TECHNOLOGIES (BY TYPE)**

- O.M. Korobkova, A.O. Hibalo, Z.S. Korobkova**  
Digitalization of customs processes in the development of international trade.....43
- A.M. Ibrahim, K.M. Klevtsov**  
Assessment of financial and operational risks in maritime multimodal transport in emergency situations..... 56
- O.Ye. Sokolova**  
Methodological framework for evaluating multimodal cargo delivery chains with an air transport component .....72
- O.V. Fomin, O.V. Burlutskiy, V.S. Lisnychiy, I.V. Gunko**  
Enhancing vehicle efficiency: high-strength steel selection for improving the load-bearing capacity of the carrying module..... 87
- Yu. F. Kholodnyi, O. V. Holovina**  
Research on methods of vehicle diagnostics under technical operation conditions based on the analysis of electrical equipment and technical condition of machine components.....106
- O.T. Chernova, G.M. Kryvenko, O.V. Kryvenko**  
Characteristics of underground gas storage at different stages of operation .....120

## МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.4

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2026.2-29.01>

### ВИБІР МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧИХ СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК СУДЕН НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЛЬНИХ КРИТЕРІЇВ

**Г.В. Кузнецов**

аспірант Навчально-наукового центру морської інфраструктури,  
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,  
Миколаїв, Україна  
ORCID ID: 0000-0002-1028-4102

#### **Анотація**

Метою роботи є підвищення енергетичної та екологічної ефективності суднових енергетичних установок відповідно до правил Міжнародної морської організації шляхом раціонального використання паливних ресурсів із застосуванням матеріалів із сукупністю раціональних теплофізичних та експлуатаційних властивостей у теплоакumuлюючих системах. Обґрунтовано вибір теплоакumuлюючого матеріалу на основі мультиплікативних інтегральних критеріїв, що відповідають ієрархічним рівням: матеріал, теплоакumuлятор і теплоакumuлююча система у складі енергетичної установки судна. Оцінка раціональності вибору матеріалу теплоакumuлюючої системи підтверджена відносною економією палива та індексом енергоефективності проєкту судна. Визначення теплоакumuлюючих матеріалів із фазовим переходом для різних температурних рівнів дає змогу ефективно використовувати в суднових енергетичних установках скидну теплоту низького потенціалу з різною інтенсивністю від відпрацьованих газів, охолоджувальної рідини та мастила, що дає змогу розширити функціональні можливості забезпечення потреб головних двигунів, дизель-генераторів, екіпажу та пасажирів. Використання визначених матеріалів з урахуванням сукупності їх характеристик: теплофізичних – температури плавлення, питомої масової теплоємності, питомої теплоти фазового переходу, густини та коефіцієнта теплопровідності; конструктивних – товщини шару й експлуатаційних – часів стоянки та ходу відповідно до експлуатаційного циклу – дає змогу забезпечити ефективні показники теплоакumuлюючої системи у складі суднової енергетичної установки. За раціональними схемними рішеннями теплоакumuлюючої системи та способами акумуляції теплоти з фазовим переходом від різних джерел теплоти – відпрацьованих газів, мастила й охолоджувальної рідини, а також з урахуванням умов роботи двигунів за експлуатаційними циклами визначено, що



забезпечення споживачів судна акумульованою теплотою дає змогу зменшити витрату палива допоміжних котлів від 5 до 64 % залежно від складу суднової енергетичної установки та призначення судна, а також забезпечити зниження значень індексу енергоефективності проєкту судна в середньому до 2 %.

**Ключові слова:** утилізація теплоти, енергоефективність, матеріали з фазовим переходом, теплові двигуни, загальносуднові та побутові потреби.

## SELECTION OF MATERIALS FOR THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS IN MARINE POWER PLANTS BASED ON INTEGRAL CRITERIA

**H.V. Kuznetsov**

Phd Student of Educational and Scientific Center of Marine Infrastructure,  
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine  
ORCID ID: 0000-0002-1028-4102

### **Abstract**

*The aim of the study is to improve the energy and environmental efficiency of marine power plants in accordance with the regulations of the International Maritime Organization through the rational use of fuel resources by applying materials with a set of rational thermophysical and operational properties in thermal energy storage systems. The selection of a phase change material is substantiated based on multiplicative integral criteria corresponding to the hierarchical levels of material, thermal energy storage unit and thermal energy storage system within the marine power plant. The rationality of selecting the material for the thermal energy storage system is confirmed by the relative fuel savings and the Energy Efficiency Design Index. The determination of phase change materials for different temperature levels makes it possible to efficiently utilize low-potential waste heat of varying intensity from exhaust gases, cooling fluid and lube oil in marine power plants, thereby expanding the functional capabilities for meeting the demands of main engines, diesel generators, crew and passengers. The use of selected materials considering the combination of their characteristics – thermophysical properties, including melting temperature, specific heat capacity, latent heat of phase transition, density and thermal conductivity; design characteristics, including layer thickness and operational characteristics, including berthing and sailing times according to the operational cycle – makes it possible to ensure efficient performance of the thermal energy storage system as part of a marine power plant. Due to rational design solutions of the thermal energy storage system and methods of latent heat accumulation from various heat sources – exhaust gases, lube oil and cooling fluid – as well as considering engine operating conditions under operational cycles, it has been determined that supplying vessel consumers with stored thermal energy makes it possible to reduce the fuel consumption of auxiliary boilers by 5–64%, depending on the composition of the marine power plant and the vessel purpose, as well as to reduce the values of the Energy Efficiency Design Index by an average of up to 2%.*

**Key words:** heat recovery, energy efficiency, phase change materials, heat engines, ship service and domestic demands.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** З огляду на масштаби та енергоємність світового флоту саме судноплавство стає однією з ключових галузей, на яку спрямовані сучасні науково-технічні ініціативи для досягнення вищих показників енергозбереження. Вимоги Міжнародної морської організації (ІМО) стосуються зниження витрати палива, обмеження викидів парникових газів та підвищення енергоефективності судових енергетичних установок (СЕУ).

Одним з актуальних напрямів зниження витрати палива й обмеження викидів парникових газів є утилізація теплоти із застосуванням у складі СЕУ теплоакмулюючих систем (ТАС) на базі теплоаккумуляторів із фазовим переходом, що дають можливість забезпечити передпускову підготовку двигунів СЕУ, загальносудові та побутові потреби для зниження експлуатаційного навантаження на допоміжні двигуни на ходу та під час стоянки в порту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання цієї проблеми, і виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Використанню ТАС з фазовим переходом та інших систем акумулювання теплоти в судових, транспортних і стаціонарних енергетичних установках присвячено значну кількість досліджень. У роботі [1] запропоновано застосування великооб'ємних теплоаккумуляторів об'ємом 1000–2500 м<sup>3</sup> для утилізації теплоти відпрацьованих газів у складі енергетичної установки торговельного судна. Показано, що залежно від об'єму акумулятора така система може зменшити витрати палива допоміжного котла на 60–90% та забезпечити річний економічний ефект близько 0,25 млн доларів США.

Перспективи використання ТАС на круїзних судах розглянуто у роботах [2–6]. Основну увагу приділено застосуванню теплоакмулюючих матеріалів (ТАМ) для забезпечення потреб гарячого водопостачання, систем HVAC та використання скидної теплоти під час стоянки судна. У роботі [2] експериментально підтверджено збільшення енергоємності системи з приблизно 20 до понад 35 кВт·год/м<sup>3</sup> за використання гібридної ТАС з ТАМ об'ємом 0,1 м<sup>3</sup>. Результати досліджень підтверджують можливість згладжування пікових теплових навантажень і зменшення споживання палива допоміжними енергетичними засобами.

Питання створення компактних модульних ТАС для судових умов досліджено в роботах [7; 8]. Розглянуто застосування плоско-пластинчастих теплоаккумуляторів із ТАМ для утилізації теплоти відпрацьованих газів. Отримані значення питомої енергоємності на рівні 45–46 кВт·год/м<sup>3</sup> свідчать про доцільність використання таких конструкцій у СЕУ, де важливими є обмеження за масою, об'ємом і компоновкою машинного відділення.

Інтегровані системи утилізації теплоти із застосуванням теплоаккумуляторів у складі комбінованих енергетичних установок досліджено в роботах [9; 10]. У роботі [10] експериментально досліджено систему SE–ORC–TES для круїзних суден, у якій величина акумульованої теплоти становила близько 8,7 кВт·год, що відповідало 7,7 % загального енергоспоживання палива, а сумарна генерація електроенергії установками ORC та Stirling досягала близько 1 % енергії палива. Показано, що поєднання ТАС з іншими засобами утилізації скидної теплоти

може підвищити загальну ефективність енергетичної установки та забезпечити часткове покриття теплових потреб судна без додаткового використання допоміжних котлів.

Суміжні дослідження у сфері транспорту [11] підтверджують доцільність використання теплоаккумуляторів для скорочення тривалості прогріву двигунів після стоянки. Показано, що використання теплоаккумуляторів дає змогу скоротити час досягнення температури 70°C приблизно на 24,4 % після 4-годинного простою двигуна, що сприяє зменшенню витрат палива та теплових викидів.

Для стаціонарних і промислових теплоенергетичних систем у роботах [12, 13] розглянуто оптимізацію режимів зарядки та розрядки теплоаккумуляторів, а також застосування високотемпературних систем акумулювання теплоти. У роботі [12] показано, що адаптивне керування режимами роботи парових аккумуляторів дає змогу зменшити необхідний об'єм теплоаккумулятора на 15–25 %. Отримані результати є важливими для вибору режимів роботи ТАС та оцінювання їх ефективності в умовах змінного теплового навантаження.

Фундаментальні питання вибору ТАМ, формулювання задач фазового переходу, інтенсифікації теплопередачі та практичного застосування ТАС узагальнено в роботах [14–16]. У цих дослідженнях розглянуто органічні й неорганічні ТАМ, особливості процесів плавлення та кристалізації, а також методи покращення теплопередачі завдяки ребренню, пористим структурам, високотеплопровідним матрицям і конструктивній оптимізації теплообмінної поверхні.

Незважаючи на значну кількість досліджень, питання комплексної інтеграції ТАС у складі СЕУ з урахуванням експлуатаційного циклу судна, структури споживачів теплоти, режимів стоянки та руху, а також особливостей використання скидної теплоти залишаються недостатньо опрацьованими. Це обумовлює необхідність подальшого дослідження ефективності застосування ТАС у СЕУ з урахуванням реальних умов експлуатації.

**Формулювання мети статті, постановка завдання.** Метою дослідження є підвищення енергетичної та екологічної ефективності СЕУ відповідно до правил ІМО шляхом раціонального використання паливних ресурсів із застосуванням у ТАС матеріалів із фазовим переходом, що відповідають сукупності раціональних теплофізичних, конструктивних та експлуатаційних властивостей.

Для досягнення цієї мети визначено такі завдання:

1. Розробити метод вибору теплоакуюлюючих матеріалів із фазовим переходом для різних температурних діапазонів шляхом квантифікації мети та визначення мультиплікативних інтегральних критеріїв вибору матеріалів на основі їх теплофізичних, конструктивних та експлуатаційних властивостей.

2. Обґрунтувати доцільність застосування мультиплікативних інтегральних критеріїв вибору теплоакуюлюючих матеріалів, що відповідають ієрархічним рівням: матеріал, теплоаккумулятор і теплоакуюлююча система для СЕУ.

3. Виконати оцінку раціональності вибору матеріалу теплоакуюлюючої системи в складі СЕУ шляхом обґрунтування відносною економією палива та індексом енергоефективності проекту судна.

Об'єктом дослідження є процеси енергозбереження в ТАС та їх вплив на енергетичну й екологічну ефективність СЕУ.

Предметом дослідження є показники енергозбереження з урахуванням теплофізичних властивостей, конструктивних схем та експлуатаційних характеристик ТАС, що забезпечують економію палива допоміжних елементів СЕУ і зниження індексу енергоефективності проєкту судна.

Методи дослідження – системний аналіз та багатокритеріальна оптимізація з мультиплікативною побудовою інтегральних критеріїв.

**Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.** Комплексна ефективність СЕУ визначається повнотою задоволення енергетичних потреб судна, його екіпажу та пасажирів за умови обмеження витрат енергоресурсів. При цьому більш ефективна СЕУ за фіксованих енергоресурсів забезпечує потреби в більшому обсязі. Це можливо шляхом забезпечення ширшої сукупності потреб окремих цілей, визначених квантифікацією. Таке послідовне виокремлення підцілей дає змогу отримати багаторівневу ієрархічну структуру елементів СЕУ з відповідними повними наборами вихідних даних для їх задоволення.

Головною особливістю енергетичних ресурсів на судні є їхня автономна обмеженість. Кількісним виразом цієї обмеженості є умова максимальної енергоємності ЕЕ у вигляді

$$EE = \frac{E}{V} \rightarrow \max ,$$

де  $E$  – сумарна енергія джерел (паливо, електроенергія, теплота),  $V$  – обсяг джерел енергії.

Стосовно  $i$ -го елемента акумулювання теплоти в СЕУ значення енергоємності виражається як

$$\frac{Q_i}{V_i} = \frac{q_i \cdot m_i}{V_i} = q_i \cdot \rho_i \rightarrow \max ,$$

де  $q_i$  – питома кількість теплоти,  $m_i$  – маса,  $\rho_i$  – густина матеріалу,

$q_i = c_{ртв} \cdot \Delta T_{тв} + r + c_{рідТМ} \cdot \Delta T_{рід}$  – сума зміни енергії внутрішнього та фазового переходу,  $c_p$  – питома ізобарна теплоємність,  $r$  – питома теплота фазового переходу,  $\Delta T = T_{дж} - T_{пл}$  – температурний перепад,  $T_{дж}$  – температура джерела,  $T_{пл}$  – температура фазового переходу, індекси:  $тв$  – твердий,  $рід$  – рідина,  $пл$  – плавлення,  $дж$  – джерело.

Оскільки інтенсивність теплопередачі в ТАМ визначається величиною  $\Delta T \rightarrow \max$ , у разі обмеження значення  $T_{дж}$  величина  $T_{пл} \rightarrow \min$ .

Вважаючи умову вибору критеріальної досконалості умовою «чим більше, тим краще», вираз критерію вибору теплоакumuлюючого матеріалу можна записати як

$$K_{ТАМi} = \frac{q_i \cdot \rho_i}{T_{плi}} \rightarrow \max .$$

Результати узагальнення представлені функціональною залежністю інтегрального критерію ТАМ від температурного перепаду на рис. 1. Матеріали з фазовим переходом за температурою плавлення були поділені на три групи – низькотемпературні, середньотемпературні та високотемпературні, що дає змогу використовувати їх для акумулювання теплоти охолоджувальної рідини, мастила та відпрацьованих газів.

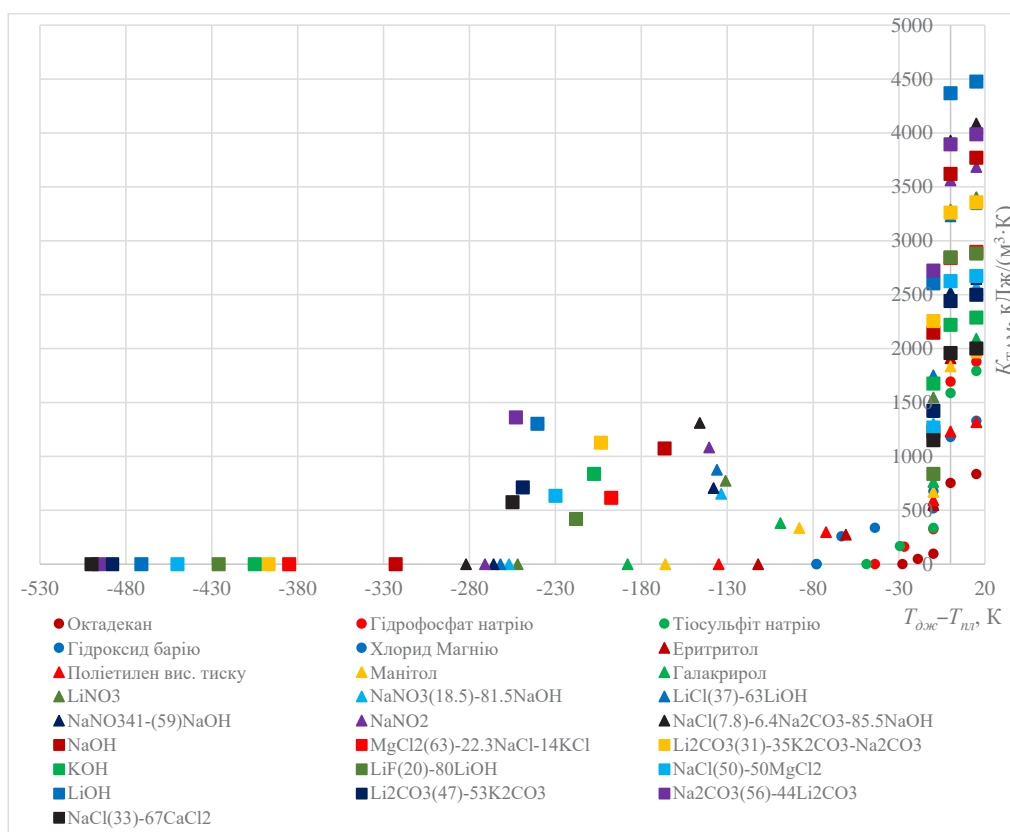


Рис. 1. Залежність інтегрального критерію  $K_{TAM}$  від температурного перепаду для теплоакуюючих матеріалів ● – низькотемпературні ( $T_{дж} = 273-380$  K), ▲ – середньотемпературні ( $T_{дж} = 273-545$  K), ■ – високотемпературні ( $T_{дж} = 273-763$  K)

На першому ієрархічному рівні дослідження вибір теплоакуючого матеріалу за інтегральним критерієм  $K_{TAM}$  здійснюється відповідно до таких його теплофізичних характеристик: температури плавлення, питомої масової теплоємності, питомої теплоти фазового переходу та густини.

Для другого ієрархічного рівня теплообмін у теплоакуючому здійснюється через теплопровідність, інтенсивність якої обернено пропорційна тепловому опору. Для процесів теплообміну з фазовим переходом загальний тепловий опір складається з теплових опорів твердої та рідкої фаз

$$R_T = \frac{\delta_{ms}}{\lambda_{ms}} + \frac{\delta_{pid}}{\lambda_{pid}},$$

де  $\delta$ ,  $\lambda$  – відповідно товщина та коефіцієнт теплопровідності ТАМ,  $\delta = \delta_{ms} + \delta_{pid}$  та дорівнює конструктивній товщині шару матеріалу в капсулі теплоакуючого, що наведена на рис. 2 вид А.

Оскільки значення коефіцієнта теплопровідності твердої фази ТАМ є більшим, ніж аналогічне значення для рідкої фази, а товщина шару змінюється, залежність загального термічного опору від рідкої масової частки ТАМ наведено на рис. 3.

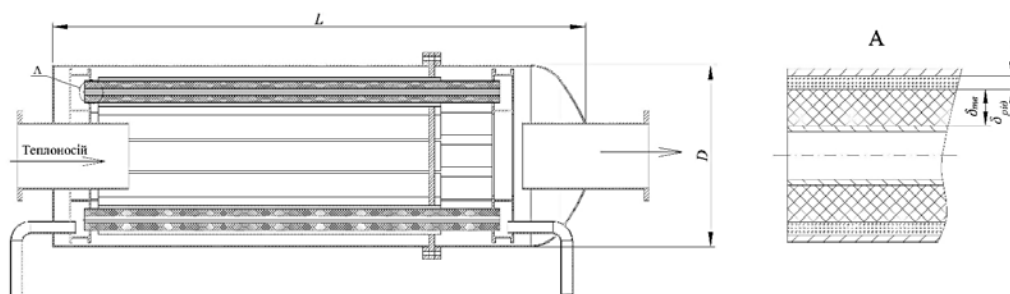


Рис. 2. Схема теплокумулятора з фазовим переходом ТАМ

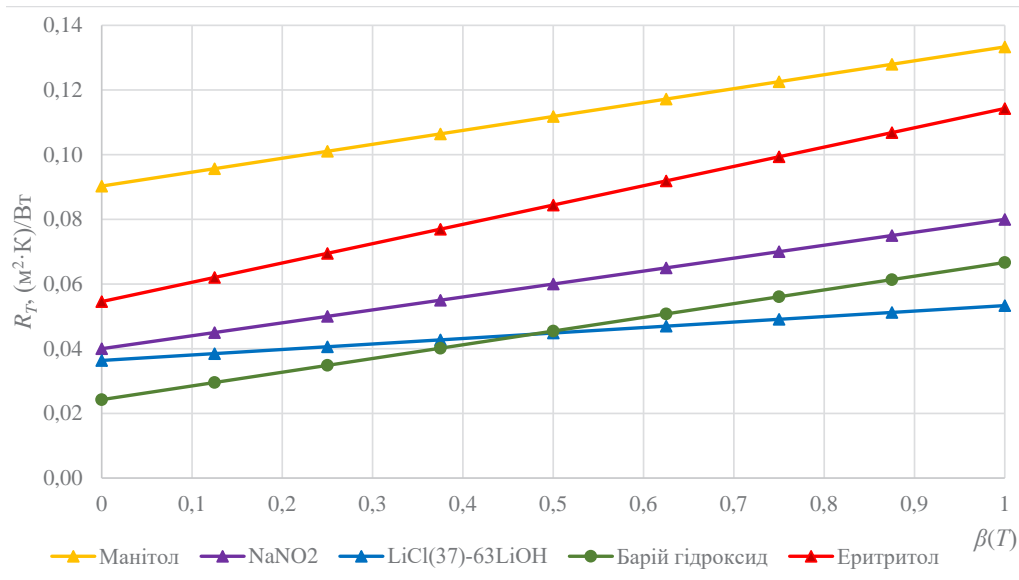


Рис. 3. Залежність  $R_T$  від рідкої масової частки

Виходячи з цього, під час оптимізації теплофізичних властивостей ТАМ для визначення масогабаритних показників теплокумуляторів доцільно застосовувати мультиплікативний інтегральний критерій такого вигляду

$$K_{TA} = \frac{K_{TAM}}{R_T},$$

залежність якого від температурного перепаду за початкової товщини ТАМ  $\delta = 40$  мм показано на рис. 4.

Умови використання ТАС як підсистеми СЕУ визначаються умовами експлуатації її основних і допоміжних елементів. Тому вид мультиплікативного інтегрального критерію оптимізації на цьому ієрархічному рівні повинен враховувати не лише потужність головних двигунів, дизель-генераторів і допоміжних котлів, які визначають рівень утилізованої теплоти, але й співвідношення інтервалів часу їх експлуатації на ходових режимах і під час стоянки відповідно

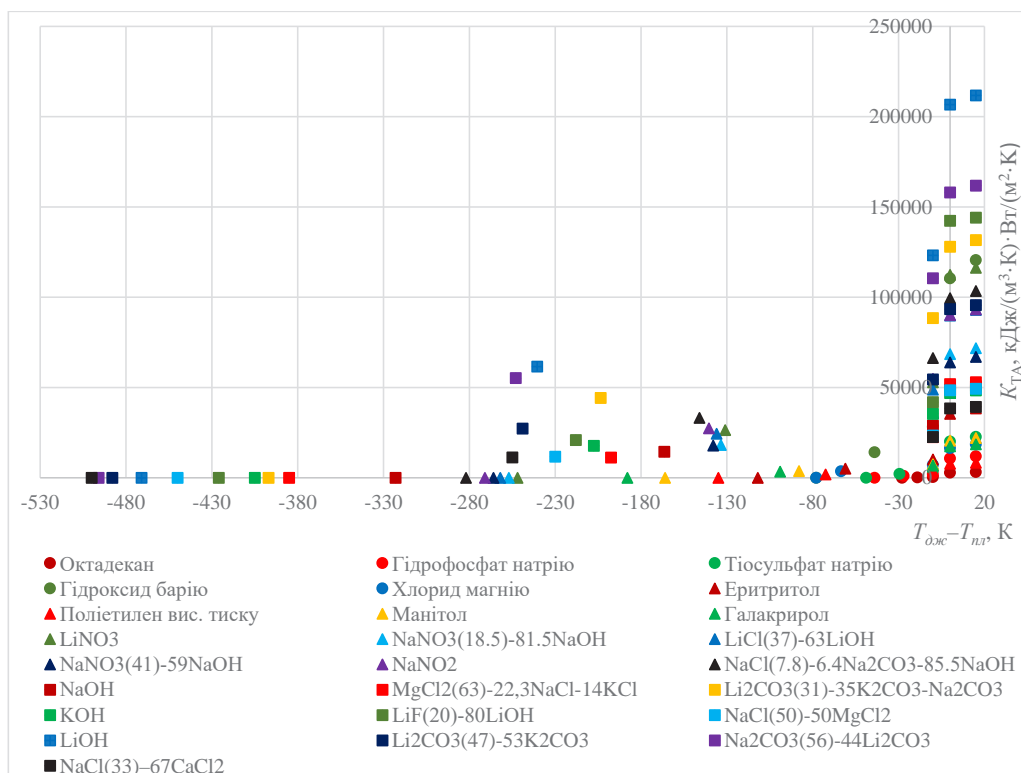


Рис. 4. Залежність інтегрального критерію  $K_{TA}$  від температурного перепаду

до експлуатаційного циклу. Цей цикл в узагальненому вигляді можна подати у вигляді виразу

$$\tau_a = \tau_1 + \tau_2 + \tau_{31} + \tau_{32} + \tau_{33} + \tau_{34} + \tau_4 + \tau_5,$$

де  $\tau_1$  – вихід судна з порту;  $\tau_2$  – перехід до району плавання;  $\tau_{31}$  – рух з економічним ходом;  $\tau_{32}$  – рух із максимальним ходом;  $\tau_{33}$  – перебування судна в дрейфі;  $\tau_{34}$  – виконання швартовних операцій;  $\tau_4$  – зворотний перехід до кінцевого порту;  $\tau_5$  – захід судна в порт.

Враховання співвідношень інтервалів часу робочих режимів і стоянок характеризує співвідношення часу накопичення та віддачі теплоти споживачам ТАС. Вплив співвідношення часу накопичення та віддачі теплоти в інтегральному критерії ТАС враховується виразом

$$K_{TAC} = K_{TA} \cdot \frac{\tau_{cmi}}{\tau_{ходi}},$$

де  $\tau_{cmi}$  та  $\tau_{ходi}$  – відповідно час стоянки та час руху відповідно до  $i$ -го етапу експлуатаційного циклу.

Характеристики  $K_{TAC}$  за співвідношення  $\tau_{cmi}/\tau_{ход} = 0,17$  для експлуатаційного циклу судна наведено на рис. 5.

Сукупність запропонованих трьох інтегральних критеріїв дає змогу на етапі науково-дослідних робіт вибрати наявні ТАМ або скласти технічне завдання на



наведені в таблиці 2, впровадження ТАС на цих суднах може забезпечити зниження індексу енергоефективності проекту судна до 2,2 %, 1,1 % та 1,8 % відповідно завдяки зниженню загального використання палива в СЕУ.

Таблиця 1

**Інтегральні показники ТАМ і теплоаккумулятора ТАС**

Двигун MAN	Теплоаккумуляторний матеріал	$K_{ТАМ}, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$	$K_{ТА}, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	Потенціал акумульованої теплоти, кДж
32/44 9L	манітол $\text{C}_6\text{H}_8(\text{OH})_6$	1749	17218	$7,86 \cdot 10^6$
	нітрит натрію $\text{NaNO}_2$	3395	75443	$1,09 \cdot 10^7$
	сіль $\text{LiCl}(37)\text{--}63\text{LiOH}$	3088	75480	$1,20 \cdot 10^7$
S60ME-C8.5	манітол $\text{C}_6\text{H}_8(\text{OH})_6$	1771	23069	$7,12 \cdot 10^6$
	еритритол $\text{C}_4\text{H}_6(\text{OH})_4$	1829	39432	$7,27 \cdot 10^6$
	барій гідроксид $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	2496	121106	$9,57 \cdot 10^6$
6G60ME-C9.5	манітол $\text{C}_6\text{H}_8(\text{OH})_6$	1771	23069	$8,35 \cdot 10^6$
	еритритол $\text{C}_4\text{H}_6(\text{OH})_4$	1829	39432	$8,60 \cdot 10^6$
	барій гідроксид $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	2496	121106	$1,11 \cdot 10^7$

Таблиця 2

**Показники відносної економії палива та індекс енергоефективності проекту судна для вибраних типів суден**

Тип судна	Кількість персоналу на судні під час стоянки, %	$K_{ТАС}$	Паливо, зекномлене під час рейсу, т	Відносна економія палива допоміжних котлів за рейс, %	Значення EEDI		
					необхідний	досягнутий	виконаний
Круїзний лайнер	50–75	7379	0,530	44,52–29,68	15,87	10,16	10,146–10,145
		32333	0,740	60,70–41,26			10,140–10,139
		32349	0,810	64,77–45,32			10,139–10,138
Балкер	75–100	11079	0,354	9,72–9,69	3,94	3,72	3,7170
		18937	0,362	9,94–6,81			3,7169
		58163	0,472	12,96–8,88			3,7161
Танкер	75–100	9662	0,461	7,41–5,48	3,64	2,81	2,8062
		16516	0,474	7,63–5,64			2,8060
		50725	0,614	9,88–7,31			2,8049

### Висновки

1. Запропоновано метод вибору теплоакumuлюючих матеріалів із фазовим переходом для різних температурних рівнів, який дає змогу раціонально використовувати в суднових енергетичних установках скидку теплоту різних потенціалів від відпрацьованих газів, охолоджувальної рідини та мастила, що дає змогу розширити функціональні можливості забезпечення потреб головних двигунів, дизель-генераторів, загальносуднових систем, екіпажу та пасажирів.

2. Обґрунтовано застосування теплоакumuлюючих матеріалів для теплоакumuлюючої системи у складі суднової енергетичної установки з урахуванням таких характеристик: теплофізичних – температури плавлення, питомої масової теплоємності, питомої теплоти фазового переходу, густини та коефіцієнта теплопровідності; конструктивних – товщини шару й експлуатаційних – часу стоянки та ходу згідно з експлуатаційним циклом на підставі отриманих оцінок показників відносної економії палива та індексу енергоефективності проекту судна.

3. За раціональними схемними рішеннями теплоакumuлюючої системи та способами акумуляції теплоти з фазовим переходом від різних джерел теплоти – відпрацьованих газів, мастила й охолоджувальної рідини, а також з урахуванням умов роботи двигунів за експлуатаційними циклами визначено, що забезпечення споживачів судна акумульованою теплотою дає змогу зменшити витрату палива допоміжних котлів від 5 до 64 % залежно від складу СЕУ та призначення судна, а також забезпечити зниження значень індексу енергоефективності проекту судна в середньому до 2 %.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Baldi F., Gabrielli C., Melino F., Bianchi M. A preliminary study on the application of thermal storage to merchant ships. *Energy Procedia*. 2015. Vol. 75. P. 2169–2174. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.364.
2. Frazzica A., Manzan M., Palomba V., Brancato V., Freni A., Pezzi A., Vaglieco B.M. Experimental validation and numerical simulation of a hybrid sensible-latent thermal energy storage for hot water provision on ships. *Energies*. 2022. Vol. 15. 2596. DOI: 10.3390/en15072596.
3. Manzan M., Pezzi A., Zandegiacomo de Zorzi E., Freni A., Frazzica A., Vaglieco B.M., Lucio Z., Claudio D. Potential of thermal storage for hot potable water distribution in cruise ships. *Energy Procedia*. 2018. Vol. 148. P. 1105–1112. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.08.044.
4. Virtanen J. *Thermal energy storage for cruise ship's cooling system: system design and operating principles*: master's thesis. Tampere, 2024. 109 p.
5. Thermal storage and heat pumps: a step towards zero-emission cruise ships. URL: <https://blog.sintef.com/ocean/thermal-storage-and-heat-pumps-a-step-towards-zero-emission-cruise-ships/> (дата звернення: 01.05.2026).
6. Brancato V., Fotia A., Palomba V., La Rosa D., Costa F., Frazzica A. Investigation on a thermal energy storage system to maximize the use of vessels' waste heat in port and during hoteling operations. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2893. 012021. DOI: 10.1088/1742-6596/2893/1/012021.

7. Ciappi L., Niknam P., Fisher R., Sciacovelli A. Application of flat plate latent heat thermal energy storage for waste heat recovery and energy flexibility in maritime sector. *Proceedings of the 36th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. Las Palmas de Gran Canaria, 2023. P. 2342–2353. DOI: 10.52202/069564-0211.
8. Nawfal Z.M., Nagentra R.T., Vishnu G., Silaipillayarputhur K. Design of thermal energy storage system. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 455. 02011.
9. Catapano F., Frazzica A., Freni A., Manzan M., Micheli D., Palomba V., Sementa P., Vaglieco B.M. Development and experimental testing of a waste-heat recovery system for naval applications. *Applied Energy*. 2022. Vol. 311. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.118673.
10. Revisiting thermal energy storage for vessel propulsion. URL: <https://maritime-executive.com/editorials/revisiting-thermal-energy-storage-for-vessel-propulsion> (дата звернення: 01.05.2026).
11. Kosztyła T., Tutaj J. An application of the heat accumulator and improvement of the DC-DC converter for hybrid-electric vehicles. *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2016. Vol. 23, No. 3. P. 263–270. DOI: 10.5604/12314005.1216492.
12. Sun W., Hong Y., Wang Y. Operation optimization of steam accumulators as thermal energy storage and buffer units. *Energies*. 2017. Vol. 10, No. 1. 17. DOI: 10.3390/en10010017.
13. Gil A., Medrano M., Martorell I., Lázaro A., Dolado P., Zalba B., Cabeza L.F. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1: Concepts, materials and modellization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14. P. 31–55.
14. Agyenim F., Hewitt N., Eames P., Smyth M. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14. P. 615–628.
15. Elarem R., Alqahtani T., Mellouli S., Askri F., Edacherian A., Vineet T., Badruddin I. A., Abdelmajid J. A comprehensive review of heat transfer intensification methods for latent heat storage units. *Energy Storage*. 2020. DOI: 10.1002/est2.127.
16. Zalba B., Marín J.M., Cabeza L.F., Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*. 2003. Vol. 23. P. 251–283. DOI: 10.1016/S1359-4311(02)00192-8.
17. IMO Train the Trainer (TTT) Course on Energy Efficient Ship Operation. Module 2 – Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines. London: International Maritime Organization, 2016.

## REFERENCES

1. Baldi, F., Gabriellii, C., Melino, F., Bianchi, M. (2015). A preliminary study on the application of thermal storage to merchant ships. *Energy Procedia*, 75, 2169–2174. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.364.
2. Frazzica, A., Manzan, M., Palomba, V., Brancato, V., Freni, A., Pezzi, A., Vaglieco, B.M. (2022). Experimental validation and numerical simulation of a hybrid sensible-latent thermal energy storage for hot water provision on ships. *Energies*, 15, 2596. DOI: 10.3390/en15072596.
3. Manzan, M., Pezzi, A., Zandegiacomo de Zorzi, E., Freni, A., Frazzica, A., Vaglieco, B.M., Lucio, Z., Claudio, D. (2018). Potential of thermal storage for hot potable water distribution in cruise ships. *Energy Procedia*, 148, 1105–1112. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.08.044.
4. Virtanen, J. (2024). *Thermal energy storage for cruise ship's cooling system: System design and operating principles* (Master's thesis). Tampere.
5. Thermal storage and heat pumps: A step towards zero-emission cruise ships. Retrieved from <https://blog.sintef.com/ocean/thermal-storage-and-heat-pumps-a-step-towards-zero-emission-cruise-ships/>.
6. Brancato, V., Fotia, A., Palomba, V., La Rosa, D., Costa, F., Frazzica, A. (2024). Investigation on a thermal energy storage system to maximize the use of vessels' waste heat in port and during hoteling operations. *Journal of Physics: Conference Series*, 2893, 012021. DOI: 10.1088/1742-6596/2893/1/012021.
7. Ciappi, L., Niknam, P., Fisher, R., Sciacovelli, A. (2023). *Application of flat plate latent heat thermal energy storage for waste heat recovery and energy flexibility in maritime sector*. Proceedings of the 36th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. DOI: 10.52202/069564-0211.
8. Nawfal, Z.M., Nagentra, R.T., Vishnu, G., Silaipillayarputhur, K. (2023). *Design of thermal energy storage system*. E3S Web of Conferences.
9. Catapano, F., Frazzica, A., Freni, A., Manzan, M., Micheli, D., Palomba, V., Sementa, P., Vaglieco, B.M. (2022). Development and experimental testing of a waste-heat recovery system for naval applications. *Applied Energy*, 311. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.118673.
10. Revisiting thermal energy storage for vessel propulsion. Retrieved from <https://maritime-executive.com/editorials/revisiting-thermal-energy-storage-for-vessel-propulsion>.
11. Kosztyła, T., Tutaj, J. (2016). An application of the heat accumulator and improvement of the DC-DC converter for hybrid-electric vehicles. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 23(3), 263–270. DOI: 10.5604/12314005.1216492.
12. Sun, W., Hong, Y., Wang, Y. (2017). Operation optimization of steam accumulators as thermal energy storage and buffer units. *Energies*, 10(1), 17. DOI: 10.3390/en10010017.
13. Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lázaro, A., Dolado, P., Zalba, B., Cabeza, L. F. (2010). State of the art on high temperature thermal energy

- storage for power generation. Part 1: Concepts, materials and modellization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 31–55.
14. Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., Smyth, M. (2010). A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 615–628.
  15. Elarem, R., Alqahtani, T., Mellouli, S., Askri, F., Edacherian, A., Vineet, T., Badruddin, I.A., & Abdelmajid, J. (2020). A comprehensive review of heat transfer intensification methods for latent heat storage units. *Energy Storage*. DOI: 10.1002/est2.127.
  16. Zalba, B., Marín, J.M., Cabeza, L.F., Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23, 251–283. DOI: 10.1016/S1359-4311(02)00192-8.
  17. International Maritime Organization. (2016). IMO Train the Trainer (TTT) course on energy efficient ship operation. Module 2 – Ship energy efficiency regulations and related guidelines. London: International Maritime Organization.

Дата першого надходження статті до видання: 24.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 01.07.2026

## CONCEPTUAL DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEM MODEL FOR SHIP CERTIFICATES PROCESSING

D.O. Iakymenko<sup>1</sup>, O.I. Sagaydak<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IMO expert, Postgraduate

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

ORCID ID: 0009-0001-1527-0236

<sup>2</sup>PhD, IMO expert, Senior Lecturer, Navigation and Ship's Handling Chair

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-8294-8828

### Summary

Nowadays, there has been a significant increase in the speed of loading and discharging operations in ports, as well as in ship speeds at sea. This trend leads ship managers to attempt to reduce the time spent on non-commercial operations. Inspections carried out by Port State Control (PSC) or Flag State Control (FSC) are typical examples of such operations. Although these inspections do not generate profit, they are essential for ensuring maritime safety and therefore cannot be shortened without compromising safety.

However, certain procedures may be optimised through the application of modern information technologies. One such procedure is the verification of ship documents for authenticity.

**Purpose:** The purpose of this article is to propose a conceptual model for IT solution that facilitate the verification and validation of the ship documentation. The assessment includes the identification of the gaps, formalisation of the requirements based on the available enterprise architectures, and analysis of several of the most effective industry-standard technologies applicable to PSC and FSC procedures according to these requirements. These technologies were subsequently analysed in terms of their advantages and disadvantages, based on their implementation in various domains, as well as their adaptability to maritime procedures.

**Results:** As a result of this research, the conceptual model of the IMO ship's certificate system is proposed. The study consistently and convincingly demonstrates the compliance of the proposed model with the formal criteria and satisfaction of the initial requirements for the formulated problem.

**Conclusions:** Based on the findings, a new conceptual interaction model is proposed, based on the ePhyto system that is already implemented within certain United Nations agencies. This model is efficient, reliable, and requires minimal adaptation compared to alternative solutions. Given that the International Maritime Organization (IMO) is also a United Nations agency, this approach represents a cost-effective and practical solution for improving document verification procedures.

**Key words:** IT technologies, port and flag state control, document check, ship inspection, ePhyto model, Maritime Transport, Safety, Containers, Cybersecurity, Decision-support systems, Operational Efficiency, Reliability, Optimization, Regulatory



*Compliance, Artificial Intelligence (AI), Cargo Handling, Fuzzy Logic, Intelligent systems, Logistics, Supply Chain Integration, Terminal management, Approximation model, Cost minimization, Information priority, Knowledge extraction, Marine logistics, Port operations, Process description, Professional development, Project management, Semantic classification, Standardization, Transport automation, User competence.*

## КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ РОЗПОДІЛЕНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ОБРОБКИ СУДНОВИХ СЕРТИФІКАТІВ

Д. А. Якименков<sup>1</sup>, О. І. Сагайдак<sup>2</sup>

<sup>1</sup>експерт ІМО, аспірант

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

ORCID ID: 0009-0001-1527-0236

<sup>2</sup>доктор філософії, експерт ІМО, ст. викладач кафедри НКС

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

ORCID ID: 0000-0002-8294-8828

### **Анотація**

**Вступ.** У наш час спостерігається значне збільшення швидкості вантажно-розвантажувальних операцій у портах, а також швидкості суден у морі. Ця тенденція змушує менеджерів суден намагатися скоротити час, витрачений на некомерційні операції. Типовими прикладами таких операцій є інспекції, що проводяться органами контролю держави порту (PSC) або контролю держави прапору (FSC). Хоча ці інспекції не приносять прибутку, вони важливі для забезпечення безпеки на морі, тому їх не можна скоротити без шкоди для безпеки.

Проте деякі процедури можна оптимізувати за допомогою сучасних інформаційних технологій. Однією з таких процедур є перевірка суднових документів на справжність.

**Мета:** мета цієї статті полягає в тому, щоб запропонувати концептуальну модель IT-рішення, яке полегшить перевірку та валідацію суднової документації. Оцінка включає виявлення прогалів, формалізацію вимог на основі наявних корпоративних архітектур та аналіз кількох найбільш ефективних галузевих стандартних технологій, застосованих до процедур PSC і FSC відповідно до цих вимог. Згодом ці технології були проаналізовані з точки зору їхніх переваг і недоліків на основі їх впровадження в різних областях, а також їх адаптованості до морських процедур.

**Результати:** в результаті цього дослідження запропоновано концептуальну модель системи суднових сертифікатів ІМО. Дослідження послідовно та переконливо демонструє відповідність запропонованої моделі формальним критеріям та відповідність вихідним вимогам до сформульованої проблеми.

**Висновки:** на основі отриманих даних запропоновано нову концептуальну модель взаємодії, засновану на системі ePhyto, яка вже впроваджена в деяких установах ООН. Ця модель є ефективною, надійною та потребує мінімальної адаптації порівняно з альтернативними рішеннями. З огляду на те, що Міжнародна морська організація (ІМО) також є установою ООН, цей підхід є економічно ефективним і практичним рішенням для вдосконалення процедур перевірки документів.

*Ключові слова:* ІТ технології, контроль держави порту та прапору, перевірка документів, інспекція судна, ePhyto модель, морський транспорт, безпека, контейнери, кібербезпека, системи підтримки рішень, операційна ефективність, надійність, оптимізація, відповідність вимогам, штучний інтелект (ШІ), обробка вантажів, нечітка логіка, розумні системи, логістика, інтеграція ланцюгів постачання, керування терміналом, модель апроксимації, мінімізація витрат, інформаційний пріоритет, вилучення знань, морська логістика, портові операції, опис процесу, професійний розвиток, управління проектами, семантична класифікація, стандартизація, автоматизація транспорту, компетенція користувача.

### **Introduction**

Modern shipping is characterised by high operational speeds and increasing vessel sizes. The number of ships has also grown significantly. The speed of port operations has increased considerably compared to a decade ago; loading and discharging operations that once took weeks may now be completed within hours. Consequently, the duration of cargo operations has become comparable to auxiliary ship operations such as mooring, bunkering, or obtaining free pratique.

In such circumstances, ship managers strive to minimise the duration of non-revenue-generating activities. At the same time, shortening certain operations may have serious implications for safety (e.g. mooring), while others remain mandatory for vessels calling at ports, such as inspections by PSC or FSC authorities.

According to the United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS), the Flag State bears primary responsibility for the safety of its vessels. This responsibility is exercised through periodic surveys and the issuance of certificates confirming compliance. Port States, in turn, are entitled and obliged to verify compliance with safety and environmental protection requirements during a vessel's port stay. [1].

Moreover, according to the Article 217 (3) of UNCLOS, Flag State must provide all crew members of the ship, flying its flag, with the certificates (licenses), for proving their competency.

Flag States may delegate certain responsibilities to Recognized Organizations (ROs), including surveys and certification activities (according to the RO Code – MSC.349(92) and MEPC.237(65)) [2]. In particular, Flag State can delegate to RO duties on fulfilling surveys of its ships and issuing proper certificates of compliance with the regulations.

Port State is to fulfil inspections on compliance monitoring (Article 219 of UNCLOS) [1]. According to Procedures for Port State Control, such inspections in general, to be limited by the inspection of documents, such as certificates of the ship, issued by Flag State and RO, and crew licenses and certificates, issued by National Authorities of the crew and endorsed by Flag State. More detailed inspection to be initiated in case clear grounds of non-compliance is found only [3].

In addition to regulatory inspections, vessels may also be inspected by commercial entities, such as charterers, particularly in the tanker sector. These inspections typically begin with document verification.

Thus, the accuracy and efficiency of document inspection are critical. Errors may result in undue delays or, conversely, failure to identify substandard vessels. Although inspections are often conducted in parallel with cargo operations, they impose additional workload on crew members, who are already operating under constrained conditions.

In general, survey or inspection of the ship should not affect ship's activity – cargo operations and other. However, even if inspection is carrying out in parallel with cargo

operations, ship's crew should be engaged in it anyway. Taking into account limited number of the crew members and their constant overload with the other tasks, inspection affects ship's activity in any case – it is additional workload for the crew.

It should be noticed the high importance of the timely inspection of the ship, which is essential part of the unified system of Compliance Monitoring and, on the other hand, can affect ship's operations. Therefore, improving the efficiency of document verification processes is significant for all stakeholders in the maritime industry.

This article will propose an assessment of the existing IT best practices that are present in logistics. To achieve this goal as a first step the requirements would be formulated. Then widely used enterprise architectures would be reviewed as a framework for such requirements application. And as a last step, some of the best IT solutions, that are close to the requirements, would be compared using the best matching enterprise architecture approach.

The purpose of this article is to propose a new conceptual model for interaction between parties involved in port and flag control procedures, based on an analysis and evaluation of best practices and approaches.

#### *Current situation*

At present, most ship and seafarer certificates are issued in paper form. Consequently, inspections can generally only be conducted once a vessel has arrived at port. Some administrations require scanned copies of certificates to be submitted in advance; however, this does not significantly accelerate verification.

As usual, Flag Administration issues just a few types of certificates (usually these are Flag Certificate, Radio Station Certificate and Minimum Safe Manning Certificate), all other certificates to be issued by Recognized Organization.

Certificates issued by Flag States can usually be verified via official administration websites. However, certificates issued by ROs are more difficult to verify due to the large number of organizations and lack of standardisation. (the certificates of the IACS members relatively straightforward to check for authenticity).

However, problem might appear even with IACS certificates – when the ship passed some survey in time, but original certificate still not delivered on board of the ship due to delay of the courier mail or some other reason. Absence of the certificate may lead to the detailed inspection.

Another problem – ships of so-called “shadow fleet” – quite large number of vessels that operate without full regulatory compliance, or ships used to circumvent sanctions, oversight, or certification requirements. It may also refer to vessels with hidden or non-disclosed flags, beneficial ownerships, or misrepresented registry details. The key risks include regulatory, safety, financial, and environmental dimensions.

There are many risks associated with the operation of a “shadow fleet”:

Regulatory and compliance risks

– Operating without valid or recognized certificates, or under improper flag/RO authorization.

– Inadequate ISM audits, safety management, or crew training not aligned with flag/RO expectations.

– Sanctions and trade restrictions that make shadow fleet operations illegal or risky.

Safety and environmental risks

– Substandard safety management leading to higher likelihood of accidents, pollution, and crew harm.

– Inadequate maintenance and certification of safety-critical equipment (lifesaving appliances, firefighting, pollution prevention equipment).

– Higher risk of port state detentions, leading to operational delays, cargo losses, and reputational damage.

Financial and operational risks

- Increased insurance premiums, non-coverage due to non-compliance, or difficulty obtaining P&I coverage.
- Higher likelihood of port state detentions, cargo rejection, lay-up costs, and scrapping liabilities.
- Revenue leakage and increased downtime due to lack of access to legitimate financing, charters, or insurance markets.

Reputation and sanctions risks

- Association with illicit registries or shadow fleet practices can trigger investigations, reputation harm, and loss of business.
- Difficulty in obtaining future charters or access to certain ports or markets.

Checking all documents of such ships (including insurance certificates / P&I documentation) gives the opportunity to find out substandard ship easily. But it is not so easy to do it quickly and carefully. Every ship must keep on board quite a large number of various certificates (see as example requirements of Panama flag – Table 1).

Table 1

**Example of the ship's documents, required by Flag State  
(in particular – Panama)**

PANAMA		
TYPE OF CERTIFICATE	CONVENTION	
Safety Construction Certificate	SOLAS 92 I/12(a)(ii)	X
Safety Equipment certificate	SOLAS 92 I/12(a)(iii)	X
Safety Radio certificate	SOLAS 92 I/12(a)(iv)	X
ILLC (66) (Intl. Load Line)	LOAD LINE 66 art. 16	X
IOPP certificate MARPOL	73/78 Annex I reg.5	X
NLS/IPPC certificate (*1)	MARPOL 73/78 Annex II reg.12, 12A	
ISPP certificate	MARPOL 73/78 Annex IV reg.4	X
ICOF / COF chem	IBC Code section 1.5 /BCH Code section 1.6	
ICOF / COF gas	IGC Code section 1.5 /GC Code and GC ex Code section 1.6	
ISM – (SMC) certificate	SOLAS 92 IX/4.3	X
ISM – (DOC) certificate	SOLAS 92 IX/4.1	X
Document of compliance (dangerous goods)	SOLAS 92 II-2/54.3	X
ILO crew accommodation	ILO 92 and 133	X
Cargo gear booklet	ILO 152 art. 25	X
ITC 69	ITC 1969 art. 7	X
Carriage of grain	SOLAS REG VI	X
BC Code Attestation Letter	BC CODE	X
ISPS (ISSC)	SOLAS Ch. XI-2	X
ISPS(SSP)	SOLAS Ch. XI-2	X
IAPP certificate	MARPOL 73/78 Annex VI Reg.6	X
EAPP certificate	MARPOL 73/78 Annex VI Reg. 5 & 6	X
Passenger Ship Safety Cert	SOLAS 92 I/12	

Exhaustive list of the certificates required could be found in the List of Certificates and Documents Required to be Carried on Board Ships, 2022) [4].

The situation with the documents of seafarers is also inadequate: there is a special webpage on the IMO website for this purpose. However, it is not database

of the documents, this page leads to the links to the websites of appropriate Maritime Administration. Each of them has own construction, structure and abilities, so check of the documents for authenticity can take quite long time. But it is necessary to do this, taking into account large number of fraudulent documents found every year [5, 6].

So, even if some of the scanned certificates is sent to PSC office in advance (to send all of them is technically difficult), it will take long time to check them (if the careful checking procedure is supposed). This labour-intensive task takes not the time only, but resources as well. Also – there is still a room for the human error and to the possibility to make fraud certificates.

#### **Problem description**

Paper-based certification presents several operational challenges. Sometimes, paper certificates cannot be issued immediately on completing survey (if they are to be issued in the head office of RO, for example). In such situation, ship manager has also to wait till certificate will be delivered by mail – it takes additional time. Another time required for delivering from ship manager's office to the ship. Meantime, absence of any certificate on board may be considered as clear ground for detailed inspection of the ship. Detailed inspection means additional workload for the ship's crew and possible nonconformities, even if the ship is in good condition. It is recognized by IMO [7].

Paper certificate could be damaged or lost – almost in all such cases detailed inspection could not be avoided and ship will have to wait till new certificate or duplicate will be delivered. Situation with the seafarer might be even worse: in the most cases duplicate of the License or Certificate of Competency could not be issued very quick, thus the best solution in such situation is to replace this crew member, which is challenging, if this is an officer (it is not so easy to find proper candidate, to arrange entry visa, book flight, etc.)

Significant part of documental inspection is checking the certificates for authenticity. Even when verification is performed, fraudulent documents may still be difficult to detect. Meantime, there is no common database of all seafarers' documents or unified system of the similar websites (each Maritime Administration develops system of documents' check under its possibilities and wishes). Therefore, Port State Control officer might face difficulties or even technical problems while fulfilling the procedure of checking documents.

Besides that, checking of the documents doesn't guarantee their authenticity because of many methods to fake them.

Last, but not least – paper documents need paper for issuing them and energy to print them out.

Nowadays International Maritime Organization allows to issue electronic certificates [7]. However, verification procedure still remains the same. IMO doesn't require any specific form or format of the electronic certificates, leaving it to national jurisdictions (electronic certificates must comply with cyber security requirements of the International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission 27000 series standards and similar guidelines). This is traditional IMO approach; however, absence of harmonized format and common requirements makes use of electronic certificates more complex and slow down verification process.

#### **Definition of the Model**

Port State Control (PSC) and Flag State Control (FSC) represent distinct regulatory frameworks with different legal bases, responsibilities, and access to information.

FSC is responsible for certification and ongoing compliance monitoring, while PSC focuses on enforcement through inspections of foreign vessels.

The proposed model distinguishes clearly between these roles and ensures that access to information and authority is appropriately allocated.



*Pic. 1. Interaction Model definition*

Here's a concise, structured comparison between State Control (PSC) and Flag State Control (FSC) in the maritime domain, focusing on legal nature, functional differences, roles of entities, and levels of access to information.

According to the UNCLOS Convention [1] the main responsibility for the safety of the ship lies with Flag State Control, which can delegate some authority for survey and certification of the ship to Recognized Organization (RO). Functions of the Port State are to fulfil duties of compliance monitoring and enforcement (CME) and to implement appropriate regime of safety monitoring in the ports of the state.

1) Legal nature

*FSC (Flag State Control)*

– Legal basis: FSC is the exercise of the flag state's duties to ensure ships registered under its flag comply with international and national standards. This is a sovereign obligation of the flag state to verify proper certification, crewing, safety management, and conformity with applicable conventions.

– Relationship to international law: FSC is primarily the flag state's own regulatory oversight and enforcement. It uses domestic legislation aligned with international conventions and is guided by IMO instruments and, where applicable, regional regimes.

*PSC (Port State Control)*

– Legal basis: PSC is a regional or international framework that authorizes port states to inspect foreign ships calling at their ports to verify compliance with international maritime conventions and national regulations. It is rooted in international conventions (e.g., SOLAS, MARPOL, Load Lines, STCW) and, where applicable, regional MOUs (Memoranda of Understanding) on PSC.

– Relationship to international law: PSC activities are state-to-state enforcement actions exercised by a port state under its sovereign authority, supported by the ship's flag state obligations under international law.

2) Functional differences (purpose and focus):

*FSC*

– Purpose: To ensure that ships registered under the flag are maintained to international standards and that the flag state can certify ships as compliant, issue and renew certificates, and ensure proper crewing and safety management.

– Primary focus: The flag state's own fleet oversight, including ship surveys, certification (e.g., safety, pollution prevention conformity), auditing of ship management companies, and verification of flag state compliance through recognized organizations.

– Outcome: Issuance or withdrawal of certificates, detention-related actions

within the flag state's jurisdiction, sanctions against non-compliant owners/managers, and maintenance of the flag state's register's credibility.

*PSC*

– Purpose: To verify that ships calling at their ports comply with key international safety, security, and environmental protection standards; to identify deficiencies and, if necessary, detain or limit access to the port or cargo operations.

– Primary focus: Conditions aboard ships visiting the port, life-saving appliances, fire safety, machinery, crewing, documentation, and overall compliance with SOLAS, MARPOL, STCW, Load Lines, etc.

– Outcome: Issuance of deficiency lists/Detention decisions for substandard ships; inclusion in the MOU's PSC regime (IMOs listings) if deficiencies are serious; sanctions to substandard ships and potential sanctions in the ship's next port calls.

3) Roles of entities involved

*FSC*

– Key actors: Flag state competent authority (ROs), flag state inspectors, port state authorities may still coordinate but FSC decisions originate from the flag state. Flag state authorities may rely on classification societies (ROs) in audits of ship management companies, and on-board surveys.

– Data and information: Ship certificates, survey reports, crew certifications, ISM/ISPS, safety management system documentation, CG/Seafarers' records, corporate management systems, and shipyard/maintenance data. The flag state maintains the ship registry and historical compliance data.

*PSC*

– Key actors: Port state control authorities as the primary decision-maker is the port state. MOUs (e.g., Paris MOU, Tokyo MOU) provide harmonized procedures and information-sharing.

– Data and information: Ships' certificates, crew lists, safety manuals, maintenance records, and inspection results. Information is shared within the MOU network to identify non-compliant ships and to track a ship's PSC history.

4) Levels of access to information

*FSC*

– Accessibility: The flag state has access to all data related to its ships: certificates, surveys, crewing, and management. Access extends to internal registries, surveyor findings, and enforcement records. Limited sharing with other flag states or international bodies is possible when interoperable systems exist (e.g., ISM/ISPS verification and mutual recognition frameworks).

– Public visibility: Certification status and major disciplinary actions may be publicly available (e.g., via the flag state registry or IMO public records). Detailed internal audit results are typically confidential and used for regulatory actions within the flag state.

*PSC*

– Accessibility: Access is typically constrained to the ship under inspection and relevant port state authorities, plus any information shared via MOUs among port states for enforcement and risk assessment. The ship's inspection report becomes part of the ship's PSC history and can be shared with other port states under MOU procedures.

– Public visibility: Some PSC results (e.g., detention lists) may be publicly disclosed by MOUs or national authorities for transparency and to inform stakeholders. Detailed inspection reports are usually restricted to authorized authorities.

5) Interaction and dynamics – PSC and FSC interact indirectly but are distinct functions:

– A ship may be FSC compliant (i.e., holds valid certificates from its flag state), yet fail a PSC inspection when visiting a port state, leading to detentions or remedial actions under the port state's procedures.

– Conversely, a ship flagged by a compliant flag state may still have PSC deficiencies when visiting another port, prompting the port state to take action independent of the flag state's ongoing oversight.

– PSC has the obligation to inform Flag Administration about detention of the ship and major deficiencies found. Flag State has to take remedy actions to close deficiencies found.

– Information sharing occurs through international networks (e.g., IMO instruments, Paris/Madrid MOUs) to enhance global safety and environmental protection by enabling cross-referencing of ship histories and risk profiles.

#### 6) Practical implications for stakeholders

– Shipowners and operators

– Must maintain both flag state compliance (certificates, ISM/ISPS, crew qualifications) and readiness for PSC inspections in any port they call.

– Detentions under PSC can affect voyage schedules, insurance, and reputational risk; FSC non-compliance can lead to certificate withdrawal, increased regulatory scrutiny, and potential flag state sanctions.

– Port states and flag states

– PSC acts as a frontline enforcement tool in ports to ensure international standards are met by visiting ships; FSC acts as the ongoing regulatory oversight to keep the flag state register credible.

– Effective information systems and cooperation between PSC authorities and flag state competent authorities are essential to minimize duplication of work and ensure consistent enforcement.

Maritime industry has some certain specific in the issuing, verification and checking of the validity of the certificates. Major number of certificates are issued by Flag State or it's Recognized Organizations (FS delegates certain survey tasks to an RO under a formal MOA/authorization). ROs issue primary certificates on behalf of the FS (e.g., Safety Equipment Certificate, International Ship Security Certificate under the authority of the FS). The ship remains under the flag; the RO's survey reports are reviewed by the FS for final acceptance.

Issued marine certificates are subject for periodical updates and has some certain renewal cycles (typically certificates are typically valid for five years (subject to intermediate/annual surveys). ROs perform the on-board surveys, including annual/quarterly checks as mandated, but the exact cadence depends on the certificate type and flag state instructions.

Many ships operate under a "two-issuer" cadence at times: a certificate from the ROs (on behalf of the FS) and a separate statutory certificate still managed/resolved by the Flag State. Some information may be consolidated in a centralized national or regional system, but cross-checks with the FS/RO are routine.

There are several existing information systems:

– IMO DCS – the IMO ship fuel oil consumption system, consisting of requirements for ships to record and report their fuel oil consumption with a view to inform further IMO measures to reduce GHG emissions from ships.

– IHM (Inventory of Hazardous Materials) – assists compliance with regulation 5 of the Hong Kong International Convention for the Safe and Environmentally Sound Recycling of Ships, 2009

Besides that, there is several European information systems and systems of other international organizations. Integration to these information systems at the present moment seems to be not feasible due to increasing of system complexity and some other reasons, not connected to technical aspects. The feasibility of such integration to be reviewed at the next step of the research.

Thus, the only IMO system, which could be considered for the integration in this research is Global Integrated Shipping Information System (GISIS) – comprehensive online hub for the collection, processing and sharing of shipping-related data. It includes a wide range of modules, including those on: (i) contact points; (ii) global SAR plan; (iii) incidents of piracy; (iv) marine casualties; (v) ship and company particulars; and (vi) port reception facilities. IMO called for improvement of this system; thus our aim is to facilitate the work of it. Several aspects to be taken into account:

*Data flows and typical integration points*

– Flag States feed certificates, audit results, and ship registries into IMO database (GISIS) and national maritime administration portals.

– ROs submit survey reports and certificates to the FS and, where applicable, to IMO system (GISIS).

– shipowners/operators may access national or RO portals to obtain certificate statuses, due dates, and renewal requirements; port State Control may query GISIS and national systems for compliance.

*Interoperability challenges*

– Variability in data formats, certificate naming, and reporting standards across Flag States and ROs.

– Delays in updating status after surveys or renewals.

– Incomplete coverage for some ships, especially those in transitional status (e.g., newbuilds, re-flagging).

*Practical implications*

– For operators: need robust document management to track certificate validity, renewal windows, and RO/FS dependencies.

– For regulators and port controls: potential friction if data is not synchronized – risk of delays.

*Mitigation strategy for the “shadow fleet”*

– Maintain a single authoritative, auditable record of certificates, with clear ownership and expiry dates.

– Use unified document management system (GISIS would be the best suitable) that tracks RO issuance, FS approvals, and IMO submissions.

– Implement standardized data formats for certificates (e.g., use EDI or API-based integration with RO/FS portals and GISIS where available).

– Establish automated alerts for renewals, re-surveys, and status changes.

Such system will allow to vet flags, ownership chains, and RO/FS legitimacy before entering charters or leasing ships. As additional function – monitoring of sanctions lists, flag-state credibility, and RO accreditation status.

**Purposes of the research: general tasks to be fulfilled**

The high-level requirements for the system of world ships and crew’s documents could be form like in the Table 2:

Table 2

**List of system requirements**

ID	Requirement Description	Category	Priority	Rationale
RQ-01	System must provide easy access for users.	Accessibility & Usability	High	Ensures users can reach the system without obstacles.
RQ-02	System must offer a simple but secure authorization method.	Security	High	Balances usability and security to prevent unauthorized access.
RQ-03	System must support fast operation and responsiveness.	Performance	High	Improves user efficiency and experience.
RQ-04	System must allow concurrent processing of many documents.	Performance	High	Enables high throughput in document handling.
RQ-05	System must provide a user-friendly interface.	Accessibility & Usability	High	Reduces training needs and user errors.
RQ-06	System must store large volumes of data for an unlimited time.	Performance & Scalability	Medium	Ensures archival and historical access.
RQ-07	System must be accessible globally via the internet.	Accessibility	High	Enables remote and distributed work.
RQ-08	System must ensure strong protection against unauthorized access.	Security	High	Protects confidential data.
RQ-09	System must prevent alteration of already uploaded documents.	Security & Data Integrity	High	Ensures document integrity and legal compliance.
RQ-10	System must offer protection against cyber-attacks.	Security	High	Protects system from external threats.
RQ-11	System must include robust virus protection mechanisms.	Security	Medium	Minimizes malware risk from uploaded files.
RQ-12	System should require minimal operator interference for operation.	Usability & Efficiency	Medium	Increases automation and reduces human error.
RQ-13	System should be independent (self-contained, minimal external dependencies).	System Autonomy	Medium	Enhances resilience and control.
RQ-14	System must remain stable and operational during power failures (e.g., via backup systems).	Reliability	High	Ensures business continuity.
RQ-15	System should be separate from general internet tools/platforms.	Security & Autonomy	Low	Reduces risk of dependency or cross-contamination.
RQ-16	Development must engage minimal resources.	Cost Efficiency	Medium	Controls development costs.
RQ-17	System must incur minimal operating costs.	Cost Efficiency	High	Ensures sustainability of the system.
RQ-18	System must require minimal maintenance.	Maintenance	Medium	Reduces ongoing support efforts and costs.

*Possible solutions*

To address such requirements, several international IT standards for the enterprise architecture were considered, including:

- The Open Group Architecture Framework (TOGAF 10) [9]
- ISO/IEC/IEEE 42010 – Systems and Software Architecture [10]
- SABSA – Security Architecture [11]

- NIST Enterprise Architecture Model [12]
  - ArchiMate (Standard Modelling Language for EA) [13]
- Coverage of the requirements is shown in the next table:

Table 3

**Comparison table of the requirements coverage by EAs**

Requirement Group	TOGAF	ISO 42010	SABSA	NIST EA	ArchiMate
Accessibility & Usability	Yes	Yes	Partial	Yes	Yes
Performance & Scalability	Yes	Yes	Partial	Yes	Yes
Security & Data Integrity	Yes	Partial	Yes	Yes	Yes
System Autonomy & Reliability	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Cost Efficiency & Maintenance	Yes	Yes	Partial	Yes	Partial

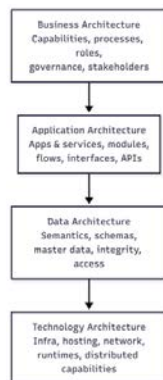
The complete coverage of all listed requirements is supported by TOGAF 10 and NIST EA. Further TOGAF will be used as an open standard. The next table maps the 18 identified system requirements to the respective architecture domains defined in the TOGAF framework. TOGAF divides enterprise architecture into four main domains: Business, Application, Data, and Technology. This mapping supports structured solution development and ensures coverage of both functional and non-functional needs.

Table 4

**Mapping of the system requirements to the TOGAF domains**

Requirement	Description	TOGAF Domain(s)
RQ-01	Easy access	Application, Technology
RQ-02	Simple, but secure authorization method	Application, Security (cross-domain)
RQ-03	Fast operation	Application, Technology
RQ-04	Opportunity to process many documents at the same time	Application, Technology
RQ-05	User-friendly interface	Application
RQ-06	Possibility to keep huge volume of information for unlimited time	Data, Technology
RQ-07	Accessibility from any point of the world	Technology
RQ-08	Strong protection from unauthorized access	Security (cross-domain), Application
RQ-09	Strong protection from change of the document, already uploaded to the system	Data, Security (cross-domain)
RQ-10	Strong protection from cyber-attacks	Security (cross-domain), Technology
RQ-11	Maximum virus protection	Security (cross-domain), Technology
RQ-12	Minimal interference of operators	Business, Application
RQ-13	System to be independent	Technology
RQ-14	System to be stable and not dependent on possible power failure	Technology
RQ-15	System to be separate from other internet instruments	Technology, Security (cross-domain)
RQ-16	Minimal resources to be engaged for development	Business
RQ-17	Minimal operation costs to be involved	Business, Technology
RQ-18	Minimal maintenance to be required	Technology

The TOGAF system architecture can be represented as layered structure:



Pic. 2. Diagram: TOGAF Architecture layers

To facilitate the analysis of possible IT solutions to cover the requirements for the system, that are listed before, the requirements could be grouped by these architecture layers. As a result, an exhaustive list of criteria for analysis is produced:

Table 5

**Criteria derived from the TOGAF Architecture layers**

TOGAF Layer	Definition	Derived Characteristics	Explanation	Why?
Business Architecture	Defines roles, responsibilities, business processes, governance, regulations	Local Independence	Each country defines and governs its own processes. System supports national procedures within a harmonized international model.	TOGAF separates business capabilities, enabling national autonomy within global exchange models.
		Decoupling (partial)	Business processes are modular and can be mapped to independent system components	
Application Architecture	Defines applications, components, services, APIs, workflows, and communication	Decoupling	Apps are designed as loosely coupled modules	TOGAF promotes service orientation and loose coupling for flexibility and autonomy.
		Interoperability	Defined service interfaces (e.g., XML messages, REST APIs) allow seamless interaction between national systems and the central hub.	
		Fault Tolerance (partial)	Retry mechanisms, stateless services, and message buffering allow the system to recover from transient failures.	
		Local Independence (reinforced)	National systems can be built using local platforms, as long as they respect global data exchange interface contracts.	

Continuation of table 5

TOGAF Layer	Definition	Derived Characteristics	Explanation	Why?
Data Architecture	Defines structure and semantics of information used across the system	Interoperability	Standardized schemas (e.g., UN/CEFACT SPS) ensure semantic alignment.	TOGAF advocates canonical data models and shared vocabularies to support integration.
		Security	Controlled access to data fields, validation of digital signatures, and ensuring document integrity rely on consistent data semantics.	
Technology Architecture	Defines infrastructure, hosting, networks, storage, and runtime environments	Distribution	Components are deployed in various regions – national servers, hubs, cloud services – and interact through secured networks.	TOGAF models physical and virtual infrastructure, emphasizing availability and performance.
		Scalability	Use of containerized services or cloud-native platforms allows the system to scale up/down based on demand (e.g., certificate surges).	
		Fault Tolerance	Failover mechanisms (e.g., backup queues, alternate hubs), retry logic, and monitoring ensure continuity of service.	
		Security (reinforced)	Network-level protections (firewalls, VPNs), endpoint hardening, and DDoS protection are implemented at infrastructure level.	
Security (Cross-layer)	Integrated across all layers to enforce trust, access control, and data protection	Security	Ensures authentication of actors, encryption of messages, validation of certificate signatures, and access control.	TOGAF and SABSA recommend embedding security architecture in all phases and layers.
		Fault Tolerance	Trust does not depend on the internal workings of other national solutions – only on message format and digital proof.	
		Decoupling	Ensures no data tampering during failover; fallback must be secure.	

Modern IT technologies propose several architecture templates for implementing such kind of IT system. Further the best use-cases listed for the systems, used in logistics. These systems demonstrate examples of the best practices in highly distributed IT solutions, tailored for the digitalisation of the international trade and transport.

– UN IPPC ePhyto;

- EU eFTI;
- Maersk/IBM Tradelens.

To formalise analysis of these systems, the 7 listed above criteria are to be used for comparison of each of these solutions and conclusions.

### **Analysis, general overview of the IT systems analysed**

This review examines three representative initiatives: the UN IPPC ePhyto solution for phytosanitary certification, the EU electronic Freight Transport Information (eFTI) framework, and the blockchain-based TradeLens platform. Each provides insights into distributed architectures, data governance, and computational requirements in cross-border contexts.

#### *1. UN IPPC ePhyto*

The ePhyto certificate (ePhyto) [14] is the electronic version of the traditional paper phytosanitary certificate, ensuring that plant consignments comply with import standards. Its architecture is composed of national systems, the Generic ePhyto National System (GeNS) for countries lacking infrastructure, and the central ePhyto Hub, which routes and validates messages. Certificates are XML-based, conforming to the UN/CEFACT SPS data model, with mandatory security measures including encryption and digital signatures.

Governance is provided by the IPPC Secretariat with UN International Computing Centre (UNICC) [17] hosting the hub. The system enables developing countries to participate through GeNS while supporting integration with national Single Window environments. Benefits include reduced fraud, greater efficiency, and global interoperability with frameworks such as EU TRACES. Computationally, the ePhyto system emphasizes asynchronous communication, persistent queuing, and stateless endpoints to achieve scalability and resilience [18,19].

#### *2. EU eFTI*

The EU eFTI Regulation (EU) [23] 2020/1056 establishes a legal and technical framework for electronic communication of regulatory freight transport information. Its federated architecture [24] includes economic operators, certified eFTI platforms, eFTI gates for secure authority access, and national authorities as consumers. Data is decentralized and accessed through harmonized interfaces based on UN/CEFACT semantic models.

The system's design principles, derived from TOGAF methodology, emphasize data sovereignty, interoperability through open standards, trust, and scalability. Governance is coordinated by the European Commission through designated national authorities and certified platforms. eFTI aims to reduce administrative burden by enabling authorities to access once-only datasets across multimodal transport chains. The architecture relies on service-based integration, federated infrastructure, and robust identity management mechanisms, ensuring computational efficiency while accommodating diverse stakeholders.

#### *3. TradeLens*

TradeLens[26], developed by IBM and Maersk, illustrates the potential and challenges of blockchain in logistics. Although decommissioned in 2023, it remains a valuable case study. Built on Hyperledger Fabric, TradeLens provided a permissioned blockchain [27] where carriers, ports, customs, and shippers shared trusted data through cryptographic

verification and smart contracts. Events and documents such as bills of lading were stored on the distributed ledger, ensuring immutability and auditability.

The architecture mapped naturally to TOGAF layers: decentralized infrastructure for distribution and fault tolerance, smart contracts and APIs for decoupling, and standardized data models for interoperability. Governance was consortium-based, with participants operating their own blockchain nodes. Computationally, TradeLens demonstrated the benefits of distributed trust and resilience, though it faced adoption and governance challenges that limited sustainability.

### Research

#### *Mapping of the IT systems characteristics*

The three solutions represent distinct but converging approaches to global data exchange. ePhyto emphasizes centralized coordination with distributed participation, ensuring interoperability and scalability through XML messaging and stateless design. eFTI promotes a federated model anchored in EU regulations, focusing on data sovereignty, semantic consistency, and governance aligned with policy frameworks. TradeLens demonstrates a blockchain-based trust infrastructure, offering immutability and resilience but with high governance and adoption complexity.

From a computational perspective, all solutions address key qualities: distribution, decoupling, interoperability, security, scalability, fault tolerance, and sovereignty. ePhyto achieves these through message queues and hub-based validation, eFTI through federated platforms and harmonized standards, and TradeLens through blockchain consensus and cryptographic identities. Each provides lessons for future systems balancing efficiency, inclusivity, and trust.

Table 6

#### Mapping of the IT systems characteristics

Topic	ePhyto (IPPC)	eFTI (EU)	TradeLens (IBM/Maersk)
Architecture of the System	Central hub with national systems and GeNS for inclusivity	Federated platforms, gates, and authorities	Permissioned blockchain (Hyperledger Fabric)
Architecture Component Roles and Descriptions	NPPOs manage national systems; UNICC runs hub; GeNS supports small states	Operators (data providers), platforms (hosts), gates (access points), authorities (consumers)	Shippers, ports, customs, and operators each run blockchain nodes
How the System Works	Certificates generated, validated, transmitted via hub	Data stored on eFTI platform; accessed by authorities via gates	Events/documents recorded on blockchain; accessed via smart contracts
Data Model	XML certificates, UN/CEFACT SPS model	Semantic models based on UN/CEFACT CCL	UN/CEFACT, GS1, WCO, EPCIS event models
System Requirements	Security, digital signatures, traceability, compliance with ISPM	Trust, data sovereignty, interoperability, eIDAS integration	Distributed trust, smart contracts, audit logs, cryptographic verification
Governance and Integration	Governed by IPPC Secretariat; integration with Single Windows	EU Commission coordination; national certification of platforms	Consortium governance (IBM, Maersk); integration via APIs or nodes
Benefits and Global Interoperability	Fraud reduction, developing country inclusion, WTO-SPS compliance	Reduced burden, harmonized access, multimodal interoperability	Trusted data sharing, immutability, cross-border compliance

*Options analysis*

This comparison highlights the differences and similarities between the ePhyto, eFTI and TradeLens system architectures, based on the enterprise architecture characteristics formulated above. The main focus is on the systemic benefits, global interoperability, and dominant data flow directions between Economic Operators (EOs) and Authorities.

1. Comparative Analysis of Benefits and Interoperability

Table 7

**Comparative analysis of benefits and interoperability**

Characteristic	ePhyto	eFTI	TradeLens	Comparison Insight
Distribution	Hub + NPPO national systems	Federated EU platforms per MS	Decentralized ledger with global node network	TradeLens and ePhyto emphasize global coverage; eFTI is EU-specific.
Decoupling	Loose coupling via hub & XML	Certified APIs with metadata exchange	Smart contracts and channelized event flow	All systems enforce modularity; TradeLens achieves highest technical decoupling.
Interoperability	UN/CEFACT SPS CCL	UN/CEFACT + EU profiles	CEFACT, GS1 EPCIS, WCO	All leverage international models; TradeLens has broader event semantics.
Security	XML Signature and PKI	Access control via certified Gates	Ledger immutability, ACLs, smart contracts	eFTI and TradeLens have platform-level access; ePhyto uses document-level trust.
Scalability	Global hub access	Expandable with national gate deployments	Add new blockchain nodes	TradeLens is designed for global horizontal scale; eFTI is more localized.
Fault Tolerance	Hub fallback, retry mechanisms	Queueing and status sync	Multi-node consensus and replication	TradeLens is more fault-tolerant due to blockchain architecture.
Local Independence	Full NPPO autonomy	Member States operate platforms	Each stakeholder operates independent node	All support local control; TradeLens provides strong node autonomy.

2. Dominant Data Flow Patterns

Below is a comparison of the main data flow direction between Economic Operators (EOs) and Authorities:

Table 8

**Dominant data flow pattern**

System	Main Flow Direction	Flow Trigger	Implication
ePhyto	Push by NPPO to Hub, Pull by importer NPPO	Issuance of certificate	Data is proactively shared via a central hub
eFTI	Pull by authority using dataset reference	Inspection or customs control	EO gives access token; authority pulls when needed
TradeLens	Push from event originator, pull by subscribers	Supply chain events	Real-time decentralized event publication

This analysis shows that while ePhyto and eFTI are primarily regulatory reporting tools, TradeLens also covers supply chain event streaming. Each system demonstrates a different level of distribution, autonomy, and interoperability.

The ePhyto model supports proactive data sharing and centralized availability via a global hub, suitable for pre-declaration and coordination. In contrast, eFTI operates on demand with access managed by dataset references, suitable for regulatory access control and reducing data exposure. Tradelens is focused on operational B2B integration, while it was intended to work with real-time events, high delays of the underlying blockchain infrastructure makes this critical. The complexity of the blockchain together with its high latency limits the use of such kind of solution.

#### **Adaptation of the ePhyto system to the conceptual model**

Considering the distinguishing the roles of the PSC and FSC based on their legal nature, goals, subjects of control, levels of access to information and legal consequences of decisions made, it is important to highlight that the proposed Model supports two clearly demarcated operating modes:

- the Port State Control mode, which provides read-only access to validated certificate data for the purpose of inspection;
- the Flag State Control mode, which provides the issuing and surveillance authorities with the ability to manage the life cycle of certificates.

The roles of the PSC and FSC are clearly mapped to the matching roles in the ePhyto system:

Table 9

**Mapping the roles within Models**

<b>PSC/FSC</b>	<b>Roles in Maritime Model</b>	<b>Roles in ePhyto model</b>
	Central IMO Exchange Hub (CIeH)	Central ePhyto Hub (CeH)
FSC / RO	National certification organizations (NCO)	National Plant Protection Organization (NPPO)
Port State Control	Certificates consumers	Certificates consumers

Following the approach, proposed by the ePhyto, the NCO can use own IT solution (National System – NS) to connect to the CIeH, or utilize the Generic Vessels’ Certificates National System (GeNS), that should provide minimum valuable functionality for the countries, that have no NS.

Such separation of the roles clearly shows that the proposed architecture discloses differences in user roles, access levels and legal consequences of relevant actions:

- does not grant PSC authorities the powers inherent in the FSC;
- makes it impossible to “mix roles” between the port state, the flag state and recognized organizations (ROs).

It is important to mention here, that proposed Model is fits perfectly the maritime certificates, taking into account the specifics of maritime transport, in particular:

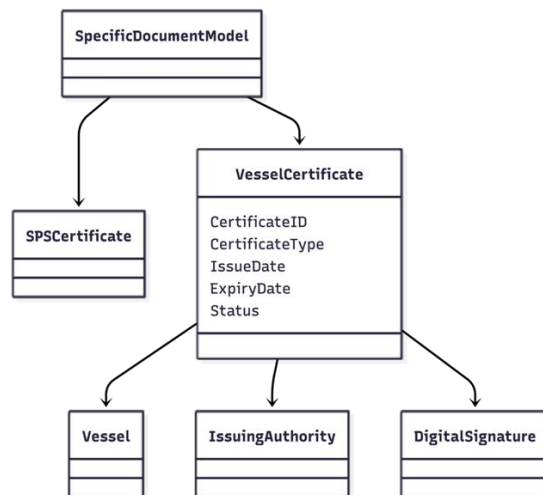
- the dynamics of port calls (port call timeline);
- a significant number of certificates and a plurality of issuers (Flag State, RO);
- high criticality of vessel delays;
- risks associated with document falsification, particularly among vessels operating within the so-called “shadow fleet”.

All these items have the same valuable roles in the plant protection workflow and are successfully implemented in the ePhyto model based on the UNICC computing resources.

Extending the Interaction Model (Figure 1), the business components roles are also derived from the ePhyto system. They are:

- central IMO Exchange Hub,
- national certification organizations – NCO (NPPOs in ePhyto model):
- the Generic Vessels' Certificates National System (GeNS),
- national systems for countries with IT capabilities.
- certificates consumers – Port State Control

Adaptation of the ePhyto system for the vessel certificates purpose should also include data model of the certificate extension to support the vessel's certificates. Due the ePhyto data model is based on the UN/CEFACT data models hierarchy, that is also used for the IMO data modelling, particularly, IMO FAL Compendium, such extension is feasible.



*Pic. 3 Vessel Certificate Data Model*

Detailed adaptation plan is subject for development as a separate project, that should also cover the functional and technical requirements of the IMO IT infrastructure landscape.

### **Conclusions**

The analysis of the reviewed solutions, that represent best practices for global trusted IT systems in logistics, demonstrates the feasibility of the IMO maritime certificates extension concept. IMO commenced major revision of the existing GISIS system. Some steps are made already on this way, mainly on interface and data visualization.

This article proposes a trustworthy enterprise architecture model for interaction between parties involved in port and flag state control procedures which provides a solution capable of offering quite seamless and reliable access to the marine certificates, that meets all major requirements and adds value to the efforts already done [28]. The formal assessment on the criteria, derived from the enterprise level architecture demonstrates advantages of the UN IPPC ePhyto solution as a reference implementation for this purpose. Still the proposed conceptual model requires some adaptation for

the specific requirements of the IMO and the task scope, the key advantage is operational trusted distributed architecture, that is based on clear requirements and data format. All components of this architecture (requirements, data model, deployment landscape for the central hub) are managed by UN body. Given its compatibility with existing UN frameworks, this approach represents a practical and scalable solution for the future development of maritime information systems. Considering that IMO is affiliated with UN, this approach can be scaled to IMO, including data model and system architecture.

## REFERENCES

1. United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS-82). [https://www.un.org/Depts/los/convention\\_agreements/texts/unclos/UNCLOS-TOC.htm](https://www.un.org/Depts/los/convention_agreements/texts/unclos/UNCLOS-TOC.htm)
2. RESOLUTION MSC.349(92) (Adopted on 21 June 2013) CODE FOR RECOGNIZED ORGANIZATIONS (RO CODE), IMO 2013
3. PROCEDURES FOR PORT STATE CONTROL, 2023 IMO Resolution A.1185(33) Adopted on 6 December 2023
4. LIST OF CERTIFICATES AND DOCUMENTS REQUIRED TO BE CARRIED ON BOARD SHIPS, IMO 2022 – FAL.2/Circ.133 MEPC.1/Circ.902 MSC.1/Circ.1646 LEG.2/Circ.4, IMO, 27 June 2022
5. REPORTS ON UNLAWFUL PRACTICES ASSOCIATED WITH CERTIFICATES OF COMPETENCY Report on fraudulent certificates. IMO HTW 9/INF.2
6. REPORTS ON UNLAWFUL PRACTICES ASSOCIATED WITH CERTIFICATES OF COMPETENCY Report on fraudulent certificates. IMO HTW 10/INF.2
7. GUIDELINES FOR THE USE OF ELECTRONIC CERTIFICATES FAL.5/Circ.39/Rev.2, IMO, 20 April 2016
8. Мазуренко О. К. Технології Blockchain в інформаційному забезпеченні логістичних послуг. *БІЗНЕСІНФОРМ*. 2019. № 12. С. 255 – 261.
9. The Open Group Architecture Framework (TOGAF 10) <https://www.opengroup.org/togaf>
10. ISO/IEC/IEEE 42010 – Systems and Software Architecture <https://www.iso.org/standard/50508.html>
11. SABSA – Security Architecture <https://sabsa.org/>
12. NIST Enterprise Architecture Model <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication500-167.pdf>
13. ArchiMate (Standard Modeling Language for EA) <https://pubs.opengroup.org/architecture/archimate32-doc/>
14. IPPC: <https://www.ippc.int>
15. IISPM 7 (Phytosanitary certification system) <https://www.ippc.int/en/publications/613/>
16. ISPM 12 (Phytosanitary certificates) <https://www.ippc.int/en/publications/609/>
17. UNICC: <https://www.unicc.org/news/2022/03/15/ippc-ephyto-solution-four-years-in>
18. FAO Phytosanitary Certification Guidelines: <https://www.fao.org/4/y3241e/y3241e06.htm>
19. Grainmart: <https://www.grainmart.in/news/procedure-for-inspection-and-issue-of-phytosanitary-certificate-psc>

20. Food Safety Works: <https://foodsafetyworks.com/insights/phytosanitary-certificate-an-important-document-for-global-trade>
21. Trade Facilitation: <https://www.tradefacilitation.org/project/digitalising-processes-to-streamline-agricultural-trade>
22. GENS IMPLEMENTATION FRAMEWORK, Version 1.0, 26 January 2021 Source: [https://www.ephytoexchange.org/landing/assets/docs/ePhyto\\_GeNS\\_Implementation\\_Framework.pdf](https://www.ephytoexchange.org/landing/assets/docs/ePhyto_GeNS_Implementation_Framework.pdf)
23. Regulation (EU) 2020/1056 on electronic freight transport information (eFTI) <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2020/1056/oj/eng>
24. eFTI Functional and Technical Architecture, European Commission, DG MOVE [https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/logistics-and-multimodal-transport/efti-regulation\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/logistics-and-multimodal-transport/efti-regulation_en)
25. EU DTLF Subgroup Reports and Recommendations [https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/digital-transport-and-logistics-forum-dtlf\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/digital-transport-and-logistics-forum-dtlf_en)
26. IBM Blockchain and Maersk TradeLens Solution Overview <https://www.maersk.com/news/articles/2022/11/29/maersk-and-ibm-to-discontinue-tradelens>
27. Jensen, T., Hedman, J., & Henningsson, S. (2019). How TradeLens Delivers Business Value With Blockchain Technology. MIS Quarterly Executive, 18(4), 221-243. DOI:10.17705/2msqe.00018, [https://www.researchgate.net/publication/345356583\\_How\\_TradeLens\\_Delivers\\_Business\\_Value\\_With\\_Blockchain\\_Technology](https://www.researchgate.net/publication/345356583_How_TradeLens_Delivers_Business_Value_With_Blockchain_Technology)
28. ENHANCEMENT OF GISIS. Update on the Global Integrated Shipping Information System (GISIS) review. C 134/9 17 May 2025, IMO London

#### ЛІТЕРАТУРА

1. United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS-82). [https://www.un.org/Depts/los/convention\\_agreements/texts/unclos/UNCLOS-TOC.htm](https://www.un.org/Depts/los/convention_agreements/texts/unclos/UNCLOS-TOC.htm)
2. RESOLUTION MSC.349(92) (Adopted on 21 June 2013) CODE FOR RECOGNIZED ORGANIZATIONS (RO CODE), IMO 2013
3. PROCEDURES FOR PORT STATE CONTROL, 2023 IMO Resolution A.1185(33) Adopted on 6 December 2023
4. LIST OF CERTIFICATES AND DOCUMENTS REQUIRED TO BE CARRIED ON BOARD SHIPS, IMO 2022 – FAL.2/Circ.133 MEPC.1/Circ.902 MSC.1/Circ.1646 LEG.2/Circ.4, IMO, 27 June 2022
5. REPORTS ON UNLAWFUL PRACTICES ASSOCIATED WITH CERTIFICATES OF COMPETENCY Report on fraudulent certificates. IMO HTW 9/INF.2
6. REPORTS ON UNLAWFUL PRACTICES ASSOCIATED WITH CERTIFICATES OF COMPETENCY Report on fraudulent certificates. IMO HTW 10/INF.2
7. GUIDELINES FOR THE USE OF ELECTRONIC CERTIFICATES FAL.5/Circ.39/Rev.2, IMO, 20 April 2016
8. Мазуренко О. К. Технології Blockchain в інформаційному забезпеченні логістичних послуг. [Tekhnolohii Blockchain v informatsiïnomu zabezpechenni lohistychnykh posluh] *БІЗНЕСІНФОРМ*. 2019. № 12. С. 255 – 261.
9. The Open Group Architecture Framework (TOGAF 10) <https://www.opengroup.org/togaf>

10. ISO/IEC/IEEE 42010 – Systems and Software Architecture <https://www.iso.org/standard/50508.html>
11. SABSA – Security Architecture <https://sabsa.org/>
12. NIST Enterprise Architecture Model <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication500-167.pdf>
13. ArchiMate (Standard Modeling Language for EA) <https://pubs.opengroup.org/architecture/archimate32-doc/>
14. IPPC: <https://www.ippc.int>
15. IISPM 7 (Phytosanitary certification system) <https://www.ippc.int/en/publications/613/>
16. ISPM 12 (Phytosanitary certificates) <https://www.ippc.int/en/publications/609/>
17. UNICC: <https://www.unicc.org/news/2022/03/15/ippc-ephyto-solution-four-years-in>
18. FAO Phytosanitary Certification Guidelines: <https://www.fao.org/4/y3241e/y3241e06.htm>
19. Grainmart: <https://www.grainmart.in/news/procedure-for-inspection-and-issue-of-phytosanitary-certificate-psc>
20. Food Safety Works: <https://foodsafetyworks.com/insights/phytosanitary-certificate-an-important-document-for-global-trade>
21. Trade Facilitation: <https://www.tradefacilitation.org/project/digitalising-processes-to-streamline-agricultural-trade>
22. GENS IMPLEMENTATION FRAMEWORK, Version 1.0, 26 January 2021 Source: [https://www.ephytoexchange.org/landing/assets/docs/ePhyto\\_GeNS\\_Implementation\\_Framework.pdf](https://www.ephytoexchange.org/landing/assets/docs/ePhyto_GeNS_Implementation_Framework.pdf)
23. Regulation (EU) 2020/1056 on electronic freight transport information (eFTI) <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2020/1056/oj/eng>
24. eFTI Functional and Technical Architecture, European Commission, DG MOVE [https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/logistics-and-multimodal-transport/efti-regulation\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/logistics-and-multimodal-transport/efti-regulation_en)
25. EU DTLF Subgroup Reports and Recommendations [https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/digital-transport-and-logistics-forum-dtlf\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/digital-transport-and-logistics-forum-dtlf_en)
26. IBM Blockchain and Maersk TradeLens Solution Overview <https://www.maersk.com/news/articles/2022/11/29/maersk-and-ibm-to-discontinue-tradelens>
27. Jensen, T., Hedman, J., & Henningsson, S. (2019). How TradeLens Delivers Business Value With Blockchain Technology. MIS Quarterly Executive, 18(4), 221-243. DOI:10.17705/2msqe.00018, [https://www.researchgate.net/publication/345356583\\_How\\_TradeLens\\_Delivers\\_Business\\_Value\\_With\\_Blockchain\\_Technology](https://www.researchgate.net/publication/345356583_How_TradeLens_Delivers_Business_Value_With_Blockchain_Technology)
28. ENHANCEMENT OF GISIS. Update on the Global Integrated Shipping Information System (GISIS) review. C 134/9 17 May 2025, IMO London

Дата першого надходження статті до видання: 14.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 01.07.2026

## ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 339.543:656.07:004

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2026.2-29.03>

### ЦИФРОВІЗАЦІЯ МИТНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ РОЗВИТКУ МІЖНАРОДНОЇ ТОРГІВЛІ

**О.М. Коробкова<sup>1</sup>, А.О. Гібало<sup>2</sup>, З.С. Коробкова<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> к.е.н., доцент кафедри «Управління портовою і сервісною діяльністю на водному транспорті»,

<sup>1</sup> Одеський національний морський університет, Одеса, Україна  
ORCID ID: 0000-0003-2279-5820

<sup>2</sup> Одеський національний морський університет, Одеса, Україна  
ORCID ID: 0009-0006-5471-5740

<sup>3</sup> Одеський національний морський університет, Одеса, Україна  
ORCID ID: 0009-0004-9044-7064

#### **Анотація**

У статті досліджено цифровізацію митної діяльності як стратегічний напрям модернізації системи міжнародної торгівлі в умовах інтенсивного розвитку інформаційних технологій. На основі аналізу сучасних наукових підходів уточнено сутність понять *digitization* і *digitalization*, а також визначено їх вплив на трансформацію державного сектору, зокрема митного адміністрування. Обґрунтовано, що цифровізація митниць виступає ключовим інструментом підвищення ефективності функціонування міжнародних торговельних потоків та забезпечення економічної безпеки держави.

Систематизовано основні цифрові технології, що використовуються в митній сфері, включно з базовими системами (*e-Customs*, *Single Window*, *Smart Customs*, *NCTS*, *EU Customs Data Hub*, *CDS*, *CAIC*) та допоміжними інструментами (штучним інтелектом, *Big Data*, *blockchain*, *Internet of Things*, хмарними технологіями, *EDI/API*). Проведено їх класифікацію за рівнем впровадження у світову митну практику (високий, середній, низький), що дало змогу визначити ступінь інтеграції цифрових рішень, їх функціональні можливості й обмеження.

Доведено, що впровадження цифрових технологій сприяє автоматизації митних процедур, підвищенню швидкості обробки даних, удосконаленню систем управління ризиками, мінімізації впливу людського фактору та зниженню рівня корупційних ризиків. Крім того, цифровізація забезпечує формування єдиного інформаційного середовища між митними органами, бізнесом та іншими учасниками зовнішньоекономічної діяльності, що сприяє підвищенню прозорості й ефективності міжнародної торгівлі.

Водночас визначено ключові проблеми та ризики впровадження цифрових технологій у митній сфері, серед яких – значні фінансові витрати на впровадження



*та підтримку інноваційних систем, нерівномірність рівня цифрового розвитку різних країн, недостатня адаптація нормативно-правової бази до технологічних змін, дефіцит висококваліфікованих кадрів, а також зростаючі загрози кібербезпеки. Обґрунтовано необхідність комплексного підходу до цифрової трансформації митних органів, що передбачає гармонізацію законодавства, розвиток інституційного середовища, інвестиції у цифрову інфраструктуру й інтеграцію інноваційних технологій.*

**Ключові слова:** *цифровізація митниці, смарт-митниця, електронна митниця, цифровізація митних процесів, автоматизація митного оформлення, електронне декларування товарів, управління митними ризиками, штучний інтелект у митниці, оптимізація митних процедур.*

#### DIGITALIZATION OF CUSTOMS PROCESSES IN THE DEVELOPMENT OF INTERNATIONAL TRADE

**О.М. Korobkova<sup>1</sup>, A.O. Hibalo<sup>2</sup>, Z.S. Korobkova<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> PhD, Professor at the Department of “Management of Port and Service Activities in Water Transport”,

<sup>1</sup> *Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine  
ORCID ID: 0000-0003-2279-5820*

<sup>2</sup> *Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine  
ORCID ID: 0009-0006-5471-5740*

<sup>3</sup> *Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine  
ORCID ID: 0009-0004-9044-7064*

#### **Summary**

*This article examines the digitalization of customs activities as a strategic direction for the modernization of the international trade system in the context of the rapid development of information technologies. Based on an analysis of contemporary scientific approaches, the study clarifies the essence of the concepts of “digitization” and “digitalization” and determines their impact on the transformation of the public sector, particularly customs administration. It is substantiated that the digitalization of customs serves as a key instrument for enhancing the efficiency of international trade flows and ensuring the economic security of the state.*

*The main digital technologies used in the customs domain are systematized, including core systems (e-Customs, Single Window, Smart Customs, NCTS, EU Customs Data Hub, CDS, and integrated automated information systems) and supporting tools (artificial intelligence, big data, blockchain, the Internet of Things, cloud technologies, and EDI/API). These technologies are classified according to their level of implementation in global customs practice (high, medium, and low), which makes it possible to determine the degree of integration of digital solutions, as well as their functional capabilities and limitations.*

*It is demonstrated that the implementation of digital technologies contributes to the automation of customs procedures, increases the speed of data processing, improves risk management systems, minimizes the influence of the human factor, and reduces corruption risks. Furthermore, digitalization ensures the creation of a unified information environment among customs authorities, businesses, and other participants in foreign*

*economic activity, thereby enhancing transparency and efficiency in international trade.*

*At the same time, key challenges and risks associated with the implementation of digital technologies in customs are identified, including significant financial costs for implementation and maintenance of innovative systems, uneven levels of digital development across countries, insufficient adaptation of the regulatory framework to technological changes, a shortage of highly qualified personnel, and increasing cybersecurity threats. The necessity of a comprehensive approach to the digital transformation of customs authorities is substantiated, including regulatory harmonization, institutional development, investment in digital infrastructure, and the integration of advanced technologies.*

**Key words:** *digitalization of customs, smart customs, electronic customs, digitalization of customs processes, automation of customs clearance, electronic declaration of goods, customs risk management, artificial intelligence in customs, optimization of customs procedures.*

**Постановка проблеми.** У сучасних умовах розвитку світова економіка дедалі більше набуває ознак інтегрованої системи, у межах якої всі суб'єкти змушені оперативно адаптуватися до динамічних змін зовнішнього середовища. Ускладнення міжнародної взаємодії, зростання обсягів міжнародних перевезень зумовили прискорений розвиток цифрових технологій у різних сферах суспільно-економічної діяльності. Митна система, як невід'ємний елемент міжнародної торгівлі, також зазнає суттєвих трансформацій, що обумовлено необхідністю оперативного вирішення складних завдань, які виникають у процесі митного забезпечення транспортних процесів.

За таких умов особливої актуальності набуває необхідність комплексного дослідження сутності цифрових трансформацій у митній сфері, а також визначення їх функціонального призначення та практичної значущості в митному забезпеченні транспортних процесів. Оцінювання рівня впровадження цифрових систем у діяльність митних органів дає змогу не лише систематизувати сфери їх застосування та розмежувати функціональні зони відповідальності, але й виявити ключові проблеми й обмеження їх використання. Це, зі свого боку, створює підґрунтя для формування стратегічних напрямів подальшого розвитку цифрових технологій та вдосконалення механізмів модернізації митної діяльності в умовах цифрової економіки.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Аналіз попередніх досліджень доцільно розпочати із зарубіжних праць, які розглядали питання цифровізації як загальної тенденції світового розвитку. Зокрема, у науковій роботі Gradillas M., Llewellyn D.W. [1] надано пояснення та розмежовано поняття digitization і digitalization, доповнено це відображенням концептуальної моделі їх взаємозв'язку та її впливу на світову інтеграцію. Зі свого боку, автори Naug N., Sorin D., Mergel I. зосереджують увагу на дослідженні впливу цифрових трансформацій на державний сектор.

Окремий напрям досліджень становить висвітлення застосування конкретних цифрових технологій у митній сфері. Так, у працях [3–5] розглядаються особливості впровадження певних технологічних інструментів з автоматизації процесів,

управління ризиком, збереження й аналізу даних, електронного документообігу в різних галузях та митній сфері відповідно.

Чимало вітчизняних робіт було присвячено висвітленню необхідності цифрової модернізації митниць. Іванова Т. В., Петренко К. В., Скоробагатова Н. Є. [6] та науковці Мацедонська Н. В., Коваленко В. В., Штефан Л. Б. аналізують у [7] вплив і роль цифровізації та технологічних нововведень у процеси митного оформлення й обліку відповідно до міжнародних стандартів. Крім того, у працях [9–12] додатково описано різні способи розвитку митної справи з використанням цифрових технологій.

Отже, аналіз наукових праць показав дослідницьку зацікавленість у питаннях упровадження цифрових технологій у митну діяльність. Водночас розвиток технологій вимагає постійного оновлення через швидкий характер змін. Таким чином, наразі недостатньо досліджень, у яких було б проведено поточну оцінку основних цифрових технологій відповідно до рівня їх упровадження в митній сфері. Це дасть можливість не лише узагальнити сучасний стан цифрового рівня митної справи, але й виділити ключові проблеми їх роботи.

**Формулювання цілей статті.** Мета дослідження полягає у визначенні цифрового ступеня розвитку митниць на основі систематизованого опису цифрових технологій за рівнем їх впровадження у світову систему, а також виділенні головних проблем їх реалізації. Необхідні кроки для виконання визначеної мети:

1. Обґрунтувати важливість та роль цифровізації митної справи у світі.
2. Систематизувати та надати опис основним цифровим технологіям, які використовуються в операційній діяльності митниць.
3. Оцінити рівень впровадження та застосування сучасних цифрових інструментів.
4. Виділити основні прогалини впровадження цифрових технологій.

**Виклад основного матеріалу.** Вимога впровадження цифрових технологій у роботу митних органів продиктована низкою факторів сучасного світового розвитку [3]:

- необхідністю підлаштуватися під мінливу зовнішню та внутрішню специфіку міжнародних відносин;
- глобальним збільшенням об'ємів міжнародних торговельних потоків;
- дотриманням і захистом національних економічних інтересів своєї країни від транскордонних та внутрішньодержавних загроз;
- виправданням очікувань бізнесу та суб'єктів ЗЕД у пришвидшенні й оптимізації рівня надання митних послуг.

Отже, виходячи із загальносвітових тенденцій і досвіду, можна виділити основні переваги впровадження цифрових технологій, які відповідають вищезгаданим умовам і набуваються під час їх упровадження.

По-перше, спрощення процесів митних процедур завдяки автоматизації операційних процесів, де головна перевага полягає у зменшенні часових і фінансових витрат, а також у підвищенні зацікавленості суб'єктів зовнішньоекономічної діяльності [12].

По-друге, централізація митної інформації з відкритим доступом. Це безпосередньо впливає на покращення аналітичної та публічної звітності із забезпеченням кращої оптимізації точності й послідовності роботи митних органів [12].

По-третє, удосконалення системи митного контролю й управління ризиками. Використання цифрових технологій відкриває доступ до автоматизованих систем аналізу, обробки даних, звітів, моніторингу інформації і даних щодо товарних потоків між державами, зі свого боку, це дає можливість виявляти заздалегідь потенціальні порушення та небезпеки [11].

По-четверте, зведення проблематики людського фактора до мінімуму. Цифровізація значно зменшує рівень імовірності корупції, небажаного втручання в митні процедури та сприяє дотриманню митних правил [12].

По-п'яте, злагоджена адаптація взаємодії митних органів з логістичними процесами бізнесу в умовах прискорення міжнародної торгівлі. Такі цифрові інструменти, як електронний обмін даними, мобільні додатки, інформаційні системи, створюють єдине інформаційне поле, що дає змогу ефективно співпрацювати з усіма учасниками митних процесів, враховуючи їх потреби [13].

Таким чином, нові цифрові технології прямо чи опосередковано сприяють спрощенню й підвищенню ефективності в пересуванні торговельних потоків, створюючи при цьому сприятливі та зручні умови для основних учасників світової торгівлі.

Як було зазначено, швидкий розвиток інформаційних систем і технологій та відповідних глобалізаційних процесів спонукає митні служби шукати заміну застарілим способам ведення своєї діяльності та впроваджувати нові методи, щоб відповідати продиктованим вимогам нашого часу [14]. Отже, на основі [3–12] та за потреби в розумінні суті інформаційних технологій зробимо розподіл цифрових технологій різних країн на дві групи: основні та допоміжні інструменти діяльності митної справи.

До основної групи віднесемо саме ті інструменти (інформаційні системи, програми), які розроблені спеціально для митних органів. Електронна митниця (e-Customs) є фундаментом цифрової трансформації міжнародної торгівлі. Перехід до концепції «Електронної митниці» (e-Customs) є найважливішим етапом реформування системи міжнародної торгівлі. Це створення інтегрованого інтелектуального середовища, де взаємодія між бізнесом і державою відбувається миттєво та безконтактно. Таким чином, система поєднала в собі основні сучасні вимоги технологічного розвитку митниць, задовольняючи потреби у спрощенні проходження митного контролю, обміну даними між суб'єктами ЗЕД і митницями [3].

Система Single Window (Єдине вікно) дає змогу користувачу значно спростити проходження митного контролю завдяки автоматизованому механізму «за замовчуванням» упродовж 4 годин, зменшує витрати часу на формальні процедури через подання й отримання необхідних документів в електронному вигляді [9, 10].

Smart Customs стала продовженням та удосконаленою версією електронної митниці. Головним нововведенням стали закладені в основі її роботи допоміжні механізми, що виконують миттєві задачі аналізування і розробки прогнозів з прийняттям відповідних оптимальних рішень [10]. Таким чином, на базі основних принципів побудови смарт-митниці (інтелектуальна система ризиків, єдиний портал надання дозвільних документів, електронне декларування, автоматизований випуск, постмитний контроль і постаудит, управління та контроль над всіма ланцюгами поставок тощо) було сформовано високоінтегровану систему митних процесів [15]

Технологічна розробка ЄС – NCTS (New Computerized Transit System) являє собою комп'ютеризовану систему режиму спільного транзиту, якою можуть користуватися лише країни, що ратифікували Конвенцію про процедуру спільного транзиту. За її використання відбувається значне спрощення подання електронних митних декларацій для спільного обміну даними між митними органами різних країн під час спільного транзиту [9, 16].

Визначальним кроком у цьому напрямі стало приєднання України у 2022 році до Конвенції про процедуру спільного транзиту, що забезпечило впровадження електронної транзитної системи NCTS та створило передумови для функціонування спільного транзитного режиму з країнами Європейського Союзу.

Ефективність упроваджених цифрових рішень підтверджується зростанням обсягів використання електронних транзитних процедур. Зокрема, значне збільшення кількості оформлених транзитних декларацій у системі NCTS свідчить про активне залучення суб'єктів зовнішньоекономічної діяльності та підвищення рівня довіри до електронних інструментів митного адміністрування.

Використання GMS (Guarantee Management System) як складової NCTS передбачає автоматизований процес подання, реєстрації та моніторингу фінансових гарантій у зовнішньоекономічній діяльності [17].

Трансформація у вигляді впровадження пілотних систем, як-от EU Customs Data Hub, що є спільним центром даних 27 національних європейських баз, де буде надана змога подавати один цифровий пакет інформації, автоматична перевірка імпорتنих декларацій з обов'язковим ризик-аналізом (за допомогою штучного інтелекту) [11].

CDS (Customs Decisions System) – це автоматизована система роботи з рішеннями митних органів, яка видає системні рішення до відповідних заяв СЗЕД стосовно прийняття авторизації, реєстрації чи наданні дозволу [14, 18].

ЄАІС (Єдина автоматизована інформаційна система митних органів) – багатофункціональна інтегрована автоматизована система, яка становить сукупність взаємопов'язаних інформаційних, електронних комунікаційних та інформаційно-комунікаційних систем, що забезпечують функціонування електронних інформаційних ресурсів митних органів із метою здійснення митної справи, і засобів їх забезпечення [9, 18].

Допоміжні інструменти, зі свого боку, виступають як складова основної групи та є своєрідними помічниками їх злагодженої та ефективної роботи Зростання кількості використання спеціалізованих мобільних додатків та вебпорталів (E-borders, СВР One, Traces NT, митниця в смартфоні тощо) спричинено їх зручністю, доступністю та компактністю основних пристроїв, на яких вони працюють, і багатофункціональністю зв'язків з іншими системами та цифровими технологіями. Наприклад, використання на вебпорталі «Єдине вікно для міжнародної торгівлі» в розділі «Довідка» на сторінці «Рахунки для сплати митних платежів» КЕП чи Q-коду, за допомогою якого система може автоматично відкрити банківську платіжну форму для поповнення авансового і внесення депозитного рахунку митниці, сплати митних боргів і платежів [17].

Для цифрового обміну даними, який є в основі роботи майже всіх митних систем, використовують різні методи обміну даними, зокрема EDI (Electronic Data

Interchange) чи API (Application Programming Interface), перша програма виступає як стандарт обміну бізнес-документів, а друга вже є сучаснішою версією та використовується для моніторингу й інтеграції з іншими системами [11].

Також оперативна робота сучасних комп'ютеризованих систем неможлива без хмарних технологій, що зберігають дані на своїх серверах, розширюючи зону доступу до них, і дають можливість зменшити витрати на IT-інфраструктуру [11].

IoT (Internet of Things) називають взаємопов'язану систему у вигляді фізичних об'єктів, які обладнані відповідними сенсорами, датчиками та програмним забезпеченням, збирають необхідну інформацію, яка, зі свого боку, відображається на користувацьких інтерфейсах пристроїв. У митній діяльності ця технологія відповідає за звітування стану товарів у реальному часі, значно полегшуючи процес роботи вищезгаданих систем для проходження митного контролю завдяки своєчасному фіксуванню змін, які можуть спричинити порушення митних правил [10, 19].

За визначенням Big Data слід називати величезний обсяг структурованих чи неструктурованих даних, отриманих з різних джерел. Важко переоцінити рівень упровадження цієї технології у митну діяльність, адже саме на її основі функціонують ключові елементи цифровізації митних органів — Smart Customs, АСМО, Data Hub та NCTS, де технологія використовується для звірки й аналізу великих масивів інформації [20, 11].

Таким чином, використання технологій Big Data забезпечує можливість інтеграції, обробки й аналітичної інтерпретації великих масивів інформації, що дає змогу підвищити точність прийняття управлінських рішень, удосконалити механізми управління ризиками та забезпечити ефективний моніторинг товарних і фінансових потоків. Крім того, застосування аналітичних моделей на основі великих даних сприяє виявленню закономірностей, прогнозуванню потенційних порушень митного законодавства та підвищенню загальної ефективності функціонування митних органів у системі міжнародної торгівлі.

Blockchain-технології, відповідно до своєї назви, передбачає збереження даних у вигляді блочного ланцюга, який унеможливає фальсифікацію інформації, зміни її постфактум. Це гарантує захист і прозорість митних транзакцій та даних.

Використання blockchain-технологій у митній сфері сприяє підвищенню рівня довіри між учасниками зовнішньоекономічної діяльності, забезпечує надійний контроль за переміщенням товарів і фінансових операцій, а також мінімізує ризики шахрайства та несанкціонованого втручання в інформаційні системи. Основні принципи функціонування blockchain чітко простежуються у роботі сучасних цифрових митних платформ, зокрема систем типу Single Window та Customs Decision Systems (CDS), де забезпечується безпечний обмін даними, їх верифікація та інтеграція між різними суб'єктами митних процесів [10, 11].

Останній (але не за важливістю) цифровий інструмент – штучний інтелект (AI). За його використання системи здатні діяти самостійно на основі закладених у нього алгоритмів, роблячи сферу його застосування різноманітною та обширною. Головна ж перевага застосування штучного інтелекту полягає у точності, прискоренні й автоматизації митних процедур через зменшення людського втручання в процеси на кшталт перевірки документів, аналізу ризиків тощо [10, 11].

Отже, проведений аналіз сучасних цифрових технологій у митній сфері засвідчив їх багатофункціональність, високий рівень інтеграції та значні масштаби впровадження у світовій практиці, що підтверджує визначальну роль цифрових трансформацій у розвитку митного адміністрування. У зв'язку із цим актуалізується необхідність проведення комплексної оцінки рівня впровадження наявних цифрових технологій, що базується на таких критеріях, як ступінь їх поширеності, рівень інтеграції у митні процеси, технологічна відповідність сучасним вимогам та ефективність практичного застосування в міжнародному середовищі. Такий підхід дає змогу не лише системно охарактеризувати поточний стан цифровізації митної сфери, але й ідентифікувати ключові обмеження, асиметрії розвитку та проблеми функціонування відповідних технологічних рішень.

З урахуванням зазначених критеріїв запропоновано класифікацію цифрових технологій за рівнем їх упровадження. До високого рівня віднесено технології, що вже стали базовими елементами функціонування митних систем і активно застосовуються в більшості країн світу. Середній рівень охоплює ті інструменти та системи, які перебувають на етапі активного розвитку, однак ще не досягли повної інтеграції у міжнародні митні процеси та мають певні функціональні або інституційні обмеження. Натомість низький рівень упровадження характерний для новітніх інноваційних рішень, що перебувають на стадії апробації та поступово інтегруються в практику діяльності митних органів.

Таким чином, інформація та аналітика джерел [3–13, 17–20] дає можливість розділити в таблиці цифрові технології на три рівні впровадження їх діяльності у світовій митній діяльності з відповідним урахуванням конкретизованих недоліків.

Відповідно до [5–12, 14–16, 20] та виходячи з даних у таблиці 1, можна описати основні проблеми та ризики у використанні цифрових технологій у митній справі, які відображені в переліку нижче:

- фінансові обмеження полягають у великій вартості початкових інвестицій, потребі в закупівлі коштовної спеціальної техніки (GPS-трекерів, RFID-мітки для IoT), підтримці обслуговування систем типу ACE чи технологічних інструментів як blockchain;

- невідповідність цифрового розвитку в різних країнах світу. Вона проявляється в тому, що різні учасники зовнішньоекономічної діяльності не мають однакового доступу до сучасних технологій і ресурсів, що значно погіршує міждержавну координацію дій між СЗЕД і митними органами;

- низькі темпи адаптації державних інституцій та законодавства відповідно до технологічного розвитку. Законсервований та бюрократичний характер органів влади безпосередньо впливає на швидкість упровадження нових технологій у роботу, оскільки не дає гарантій для бізнесу, що, наприклад, буде достатньо подання документів лише в електронному вигляді і чи не стане це причиною звинувачень у порушенні митних правил;

- недостатній рівень підготовки, обізнаності та брак висококваліфікованих спеціалістів, що можуть поєднувати високу цифрову обізнаність та професійний рівень митної діяльності у своїй роботі;

- загрози кібербезпеки. Небажане втручання сторонніх осіб до даних може призвести до витоку конфіденційної інформації чи її підтасування, відразу відобразиться в порушенні роботи митних систем.

Таблиця 1

**Систематизація цифрових технологій у митній сфері за рівнем розвитку та функціональними обмеженнями**

Групи інструментів	Найменування технології	Функції	Рівень впровадження	Основні обмеження
Основні	e-Customs	Електронне декларування, автоматизація митних процедур, обмін даними між СЗЕД і митними органами	Високий	Нерівномірність упровадження між країнами, потреба в модернізації ІТ-інфраструктури
	Single Window	Подання необхідних документів через єдиний електронний портал, автоматизований обмін інформацією	Високий	Обмежена інтеграція з окремими державними інституціями
	Smart Customs	Інтелектуальний аналіз ризиків, автоматизоване прийняття рішень, контроль ланцюгів постачання	Середній	Висока технологічна складність та вартість упровадження
	NCTS	Електронний транзит, обмін митною інформацією між країнами	Середній	Обмеження використання в певних країнах
	ЄAIC	Автоматизоване митне оформлення, управління ризиками, фінансовий контроль	Середній	Складність оновлення та підтримки системи, кібербезпека
	GMS	Управління фінансовими гарантіями в транзиті	Середній	Вузька спеціалізація
	CDS	Автоматизація прийняття митних рішень (дозволи, авторизації)	Середній	Залежність від роботи інших систем
	EU Customs Data Hub	Централізований обмін даними, автоматична перевірка декларацій	Низький	Перебуває на етапі розробки, немає практичного досвіду
Допоміжні	Мобільні додатки, вебпортали	Доступ до митних сервісів, спрощення взаємодії користувачів із системами	Високий	Кібербезпека, залежність від інтернет-доступу
	Системи цифрового обміну даними	Автоматизований обмін документами	Високий	Проблеми сумісності між платформами
	Хмарні технології	Зберігання та обробка даних, доступність інформації	Високий	Ризики витоку даних, залежність від провайдерів
	AI	Автоматизація процесів, аналіз та прогнозування ризиків, самостійне прийняття рішень	Середній	Недосконалість алгоритмів
	IoT	Моніторинг та чек-ап товарів «тут і зараз»	Середній	Висока вартість обладнання
	Big data	Аналіз великих об'ємів даних, виявлення ризиків, створення прогнозованих моделей	Середній	Складність обробки даних, коштовність підтримки
	Blockchain	Захист та прозорість даних, фінансових операцій	Середній	Дороге та складне впровадження

**Висновки.** Отже, результати дослідження свідчать, що цифровізація митної діяльності є необхідною умовою її ефективного функціонування в сучасній системі міжнародної торгівлі. Впровадження цифрових технологій дає змогу суттєво підвищити швидкість обробки інформації, удосконалити механізми управління ризиками й забезпечити більш прозору взаємодію між митними органами та суб'єктами зовнішньоекономічної діяльності.

Проведений аналіз цифрових систем та інструментів показав їх різноманітність і широке застосування у світовій практиці. Поділ на основні митні системи та допоміжні технології дав змогу чітко визначити їх функціональну роль і місце в загальній структурі митного адміністрування. Водночас встановлено, що рівень упровадження цифрових рішень є нерівномірним, що пояснюється відмінностями в технологічному розвитку, інституційній спроможності та нормативному забезпеченні різних країн.

Разом із тим виявлено, що впровадження цифрових технологій супроводжується рядом проблем, серед яких ключовими є значні фінансові витрати, недостатній рівень державної підтримки, дефіцит кваліфікованих спеціалістів, а також невідповідність законодавчої бази темпам технологічного розвитку. Окрему увагу слід приділити питанням кібербезпеки, які набувають дедалі більшого значення в умовах цифровізації.

З огляду на це подальший розвиток цифровізації митної діяльності потребує комплексного підходу, що передбачає удосконалення нормативно-правового регулювання, розвиток цифрової інфраструктури та підвищення рівня підготовки кадрів. Перспективи подальших досліджень доцільно пов'язувати з пошуком ефективних шляхів усунення існуючих недоліків та розширенням використання сучасних цифрових технологій у митній сфері.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Maria Gradillas, Llewellyn D. W. Thomas. Distinguishing digitization and digitalization: A systematic review and conceptual framework. *Journal of product innovation management*. 2023. DOI: 10.1111/jpim.12690.
2. Haug N., Sorin D., Mergel I. Digitally-induced change in the public sector: a systematic review and research agenda. *Public Management Review*. 2023. DOI: 10.1080/14719037.2023.2234917.
3. Гапонюк М., Бороденко Т. Трансформація митниці: фактори появи електронної митниці. *Grail of Science*. 2023. DOI: 10.36074/grail-of-science.14.04.2023.005.
4. Савіцький А. Управління зовнішньоекономічною діяльністю експортоорієнтованого підприємства в системі «смарт-митниця». *Вісник Хмельницького національного університету*. 2025. DOI: 10.31891/2307-5740-2025-338-20.
5. Zhong CHEN. AI-Powered Customs Clearance: Optimizing Trade Compliance and Border Management. *Journal of AI-Driven Trade Facilitation Engineering and Single Window Systems*. 2024. Vol. 2 No. 1. DOI: 10.6914/sw.010105.
6. Іванова Т. В., Петренко К. В., Скоробагатова Н. Є. Вплив цифровізації та технологічних інновацій на процеси митного оформлення та

- обліку за міжнародними стандартами. *Ефективна економіка*. 2024. № 5. DOI: 10.32702/2307-2105.2024.5.62.
7. Мацедонська Н., Коваленко В., Штефан Л. Модернізація митної діяльності з використанням інформаційних технологій. *Економіка та суспільство*. 2021. DOI: 10.32782/2524-0072/2021-27-16.
  8. Погрішук Г., Головай Н., Інноваційні технології у митній сфері: виклики та перспективи цифровізації. *Економічні горизонти*. 2026. DOI: 10.31499/2616-5236.4(29).2024.315304.
  9. Шокало В. С. Функціонування митних органів через призму діджиталізації. *Академічні візії*. 2025. DOI: 10.5281/zenodo.14635265.
  10. Рум'янцева К. Є., Головай Н. М., Руденко В. В. Розвиток інформаційних технологій у митній сфері. *Актуальні питання економічних наук*. 2025. DOI: 10.5281/zenodo.14783876.
  11. Мащенко М. А., Сергієнко О. А., Лісна І. Ф., Степуріна С. О. Цифрова трансформація митно-логістичних процесів у зовнішньоекономічній діяльності підприємств. *Український журнал прикладної економіки та техніки*. 2026. DOI: <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2026-1-2>.
  12. Щуришен Я. А. Оптимізація системи митного контролю: процес цифровізації та його наслідки. *Публічне управління та митне адміністрування*. 2025. DOI: 10.32782/2310-9653-2025-3.15.
  13. Abuselidze G., Meladze A. Innovative Customs System and its Impact on the Sustainability of the Transit Potential. *European Journal of Sustainable Development*. 2024. DOI: 10.14207/ejsd.2024.v13n1p229.
  14. Комаров О. В. Механізми цифровізації митної справи у контексті європейської інтеграції України. *Публічне управління та митне адміністрування*. 2024. DOI: 10.32782/2310-9653-2024-3.3.
  15. Івашова Л. М., Кидай Л. І. Діджиталізація митних процедур: сучасний стан та перспективи розвитку митної справи. *Публічне управління та митне адміністрування*. 2019. DOI: 10.32836/2310-9653-2019-3-218-230.
  16. Практичні питання застосування національної електронної транзитної системи та NCTS. URL: <https://uccci.org.ua/press-center/uccci-news/praktichni-pitannia-zastosuvannia-natsionalnoyi-elektronnoyi-tranzitnoyi-sistemi-ta-ncts>.
  17. Державна Митна Служба України. URL: <https://customs.gov.ua/>.
  18. Міністерство фінансів України. Наказ 19.05.2023 № 263. Про затвердження Положення про Єдину автоматизовану інформаційну систему митних органів, порядок і умови застосування її систем. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1132-23#Text>.
  19. Що таке Інтернет речей (IoT) та як він розвиває різні галузі. URL: <https://hub.kyivstar.ua/articles/shho-take-iot-tehnologiya-ta-yak-vonavplyvaye-na-rizni-galuzi>.
  20. Кірей К. Розвиток і трансформація поняття «Big Data». *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2019. DOI: 10.24025/2306-4412.1.2019.164787.

## REFERENCES

1. Gradillas, M., & Thomas, L.D.W. (2023). Distinguishing digitization and digitalization: A systematic review and conceptual framework. *Journal of Product Innovation Management*. <https://doi.org/10.1111/jpim.12690>.
2. Haug, N., Sorin, D., & Mergel, I. (2023). Digitally-induced change in the public sector: A systematic review and research agenda. *Public Management Review*. <https://doi.org/10.1080/14719037.2023.2234917>.
3. Gaponyuk, M., & Borodenko, T. (2023). Customs transformation: Factors of the emergence of electronic customs [Transformatsiia mytnytsi: faktory poiavy elektronnoi mytnytsi]. *Grail of Science*. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.14.04.2023.005> [in Ukrainian].
4. Savitskyi, A. (2025). Management of foreign economic activity of export-oriented enterprises in the “smart customs” system [Upravlinnia zovnishnoekonomichnoiu diialnistiu eksportoorientovanoho pidpriemstva v systemi «smart-mytnytsia»]. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-338-20> [in Ukrainian].
5. Chen, Z. (2024). AI-powered customs clearance: Optimizing trade compliance and border management. *Journal of AI-Driven Trade Facilitation Engineering and Single Window Systems*, 2(1). <https://doi.org/10.6914/sw.010105>.
6. Ivanova, T., Petrenko, K., & Skorobagatova, N. (2024). The impact of digitalization and technological innovations on customs clearance and accounting processes in accordance with international standards [Vplyv tsyfrovizatsii ta tekhnolohichnykh innovatsii na protsesy mytnoho oformlennia ta obliku za mizhnarodnymy standartamy]. *Efektivna ekonomika*, 5. <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.5.62> [in Ukrainian].
7. Matsedonska, N., Kovalenko, V., & Shtefan, L. (2021). Modernization of customs activity using information technologies [Modernizatsiia mytnoi diialnosti z vykorystanniam informatsiinykh tekhnolohii]. *Economy and Society*. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-27-16> [in Ukrainian].
8. Pohrishchuk, H., & Holovai, N. (2026). Innovative technologies in the customs sphere: Challenges and prospects of digitalization [Innovatsiini tekhnolohii u mytnii sferi: vyklyky ta perspektyvy tsyfrovizatsii]. *Economic Horizons*. [https://doi.org/10.31499/2616-5236.4\(29\).2024.315304](https://doi.org/10.31499/2616-5236.4(29).2024.315304) [in Ukrainian].
9. Shokalo, V. (2025). Functioning of customs authorities through the prism of digitalization [Funktsionuvannia mytnykh orhaniv cherez pryzmu didzhytalizatsii]. *Academic Visions*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14635265> [in Ukrainian].
10. Rumiantseva, K., Holovai, N., & Rudenko, V. (2025). Development of information technologies in the customs sphere [Rozvytok informatsiinykh tekhnolohii u mytnii sferi]. *Journal of Current Issues of Economic Sciences*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14783876> [in Ukrainian].

11. Mashchenko, M., Serhiienko, O., Lisna, I., & Stepurina, S. (2026). Digital transformation of customs and logistics processes in foreign economic activity of enterprises [Tsyfrova transformatsiia mytno-lohistychnykh protsesiv u zovnishnoekonomichnii diialnosti pidpriemstv]. *Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology*. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2026-1-2> [in Ukrainian].
12. Shchuryshen, Y. (2025). Optimization of the customs control system: The digitalization process and its consequences [Optymizatsiia systemy mytnoho kontroliu: protses tsyfrovizatsii ta yoho naslidky]. *Public Administration and Customs Administration*. <https://doi.org/10.32782/2310-9653-2025-3.15> [in Ukrainian].
13. Abuselidze, G., & Meladze, A. (2024). Innovative customs system and its impact on the sustainability of the transit potential. *European Journal of Sustainable Development*. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2024.v13n1p229>.
14. Komarov, O. (2024). Mechanisms of customs digitalization in the context of Ukraine's European integration [Mekhanizmy tsyfrovizatsii mytnoi spravy u konteksti yevropeiskoi intehratsii Ukrainy]. *Public Administration and Customs Administration*. <https://doi.org/10.32782/2310-9653-2024-3.3> [in Ukrainian].
15. Ivashova, L., & Kydai, L. (2019). Digitalization of customs procedures: Current state and development prospects [Didzhytalizatsiia mytnykh protsedur: suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku mytnoi spravy]. *Public Administration and Customs Administration*. <https://doi.org/10.32836/2310-9653-2019-3-218-230> [in Ukrainian].
16. Practical issues of application of the national electronic transit system and NCTS (n.d.). Retrieved from <https://ucci.org.ua/press-center/ucci-news/praktichni-pitannia-zastosuvannia-natsionalnoyi-elektronnoyi-tranzitnoyi-sistemi-ta-ncts>.
17. State Customs Service of Ukraine (n.d.). Retrieved from <https://customs.gov.ua/>.
18. Ministry of Finance of Ukraine (2023). Order No. 263 on approval of the regulation on the unified automated information system of customs authorities. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1132-23#Text>.
19. What is the Internet of Things (IoT) and how it develops different industries (n.d.). Retrieved from <https://hub.kyivstar.ua/articles/shho-take-iot-tehnologiya-ta-yak-vona-vplyvaye-na-rizni-galuzi>.
20. Kirey, E. (2019). Development and transformation of the Big Data concept [Rozvytok i transformatsiia poniattia «Big Data»]. *Journal of Cherkasy State Technological University*. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.1.2019.164787> [in Ukrainian].

Дата першого надходження статті до видання: 24.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 01.07.2026

## ASSESSMENT OF FINANCIAL AND OPERATIONAL RISKS IN MARITIME MULTIMODAL TRANSPORT IN EMERGENCY SITUATIONS

A.M. Ibrahim<sup>1</sup>, K.M. Klevtsov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Postgraduate Student at the Department of Transport Technologies  
and Mechanical Engineering,

Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine

ORCID ID: 0009-0007-6007-5708

<sup>2</sup> D.Sc., Professor at the Department of Transport Technologies and Mechanical Engineering,

Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine

ORCID ID: 0000-0001-8486-1104

### Summary

**Introduction.** The disruption of global supply chains and maritime multimodal transport caused by geopolitical tensions and infrastructure damage in Ukraine necessitates a paradigm shift in risk management. Traditional stochastic methods, particularly the Monte Carlo method, demonstrate significant limitations due to the lack of reliable retrospective statistical data in conditions of unprecedented uncertainty and continuous operational disruptions. **Purpose.** The primary purpose of this study is to present a fundamental, comprehensive analytical assessment of the risks associated with maritime multimodal supply chains and to develop an improved methodological framework. Specifically, the study aims to design a robust, integrated multi-criteria risk assessment model capable of functioning under extreme uncertainty, and to create a mathematical framework for the optimal allocation of financial and operational risks among supply chain participants, strictly accounting for the international Incoterms 2020 delivery rules. **Results.** Based on an in-depth systematic analysis of international and domestic transport practices, an integrated multi-criteria risk assessment model was developed. This model successfully combines the framework of dynamic Bayesian networks, which determine the probability of risk events occurring in real time, with advanced machine learning capabilities. Furthermore, the model incorporates the hybrid fuzzy logic method Fuzzy AHP-TOPSIS to effectively rank alternative logistics routes according to critical criteria of time, cost, and overall reliability under shifting operational conditions. **Conclusions.** Practical testing of the proposed model, utilizing the critical sector of Ukrainian grain exports as an empirical example, has confirmed its high predictive accuracy and superior adaptability to rapidly changing security environments. The integration of real-time data analysis and fuzzy logic offers a viable solution for complex decision-making in crisis logistics. Ultimately, the developed mathematical framework ensures equitable risk distribution, thereby significantly enhancing the resilience and efficiency of maritime multimodal transport networks during ongoing emergencies.

**Key words:** Transport, Risk assessment, Mathematical model, Prognostication, Mechanical resilience, Maritime logistics, Economic security, Sustainable logistics, Logistics infrastructure, Decision-making.

**ОЦІНКА ФІНАНСОВИХ ТА ОПЕРАЦІЙНИХ РИЗИКІВ  
МОРСЬКИХ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ  
В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ**

**А.М. Ібрагім<sup>1</sup>, К.М. Клевцов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> аспірант кафедри транспортних технологій та механічної інженерії,  
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна  
ORCID ID: 0009-0007-6007-5708

<sup>2</sup> д.т.н., професор кафедри транспортних технологій та механічної інженерії,  
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна  
ORCID ID: 0000-0001-8486-1104

**Анотація**

**Вступ.** Дестабілізація глобальних ланцюгів постачань та критичні пошкодження транспортної інфраструктури в Україні зумовлюють необхідність докорінного перегляду парадигми управління ризиками в морському секторі. У статті здійснено фундаментальну комплексну аналітичну оцінку ризиків морських мультимодальних перевезень в умовах надзвичайних ситуацій, зумовлених геополітичною напругою. У дослідженні обґрунтовано обмеженість традиційних стохастичних методів, зокрема методу Монте-Карло, через відсутність надійних ретроспективних статистичних даних в умовах безпрецедентної невизначеності. Встановлено, що в умовах постійного впливу факторів форс-мажору класичні імітаційні моделі минулого втрачають свою прогностичну спроможність. **Мета.** Основним завданням роботи є формування стійкої методичної основи для прийняття управлінських рішень у кризовій логістиці. На основі глибокого системного аналізу міжнародної та вітчизняної транспортної практики сформовано вдосконалений методологічний базис. Зокрема, дослідження спрямоване на розробку математичного апарату розподілу фінансових та операційних ризиків між учасниками мультимодального ланцюга постачання з чітким урахуванням базисів поставки згідно з правилами Інкотермс-2020. **Результати.** Запропоновано інтегральну багатокритеріальну модель оцінки ризиків, яка поєднує апарат динамічних Баєсівських мереж (Bayesian Networks) для визначення ймовірності настання ризикових подій у реальному часі зі здатністю до машинного навчання. Використання Баєсівського підходу дає змогу безперервно оновлювати оцінки ризиків на кожній ділянці маршруту в разі появи нових даних про стан безпеки або інфраструктури. Також застосовано гібридний метод нечіткої логіки Fuzzy AHP-TOPSIS для ранжування альтернативних логістичних маршрутів за критеріями часу, вартості та надійності. Це дає можливість нівелювати когнітивну невизначеність експертних оцінок і врахувати багатовимірність логістичних витрат. **Висновки.** Практична апробація моделі на прикладі експорту зернових культур підтвердила її високу прогностичну точність та адаптивність до мінливих безпекових умов. Доведено, що інтеграція інструментів інтелектуального аналізу даних у логістичне планування забезпечує математичне підґрунтя для мінімізації витрат та підвищення живучості транспортних мереж. Розроблений алгоритм чітко демонструє, як зміна умов поставки впливає на фінансову вразливість експортера, що є критичним для забезпечення економічної стійкості підприємства в умовах надзвичайних ситуацій.

**Ключові слова:** транспорт, оцінка ризиків, математична модель, прогнозування, механічна стійкість, морська логістика, економічна безпека, стала логістика, логістична інфраструктура, прийняття рішень.

### **Introduction**

Maritime transport has historically been, and remains, the cornerstone of the global trading system, accounting for over 80 percent of the total volume of international cargo in physical terms [1]. The smooth operation of maritime trade routes is of strategic importance for Ukraine's macroeconomic stability. Around 80 percent of the country's agricultural exports have traditionally been shipped via Ukraine's seaports primarily the deep-water terminals in the Odesa metropolitan area (Odesa, Chornomorsk, Pivdennyi) generating the lion's share of foreign exchange earnings and contributing to global food security [2].

Multimodal transport, which conceptually involves at least two different modes of transport and multiple independent operators under a single end-to-end contract, is by its very nature an extremely complex and stochastic dynamic system [3]. Given the current challenges in Ukraine, this process is made significantly more difficult. There is a need for constant, rapid changes to routes and periodic re-routing of freight flows to ports on the Danube or to western land border crossings. The problem lies in a chronic shortage of rolling stock and drivers, as well as an extremely high level of unpredictable security risks [4].

In this context, the issue of methodological support for risk assessment with mandatory consideration of the Incoterms 2020 delivery terms becomes particularly relevant. These international commercial rules were developed by the International Chamber of Commerce (ICC). They strictly regulate the allocation of liability, costs and the point at which the risk of accidental loss or damage to the goods passes from the seller to the buyer [5]. In an era of global force majeure events, the correct choice of Incoterms term is transforming from a purely legal formality into a key strategic tool for the financial management of an exporting company [6].

### **Problem Statement**

Despite the growing number of academic studies on logistics risks, a significant gap remains. This gap stems from the fact that existing models are either based on large historical datasets which are unavailable during a crisis or fail to incorporate legally binding contractual frameworks into their quantitative risk assessments. A specific example of such a contractual framework is "Incoterms 2020." This study addresses precisely this unresolved issue at the intersection of operational risk modeling and international trade law.

### **Literature Review and Research Gap**

Research into the nature of risks in maritime multimodal transport forms a broad academic discourse. Against the backdrop of global crises (such as the COVID-19 pandemic, the blockage of the Suez Canal by the Ever Given, and geopolitical crises in the Black Sea and Red Sea regions), this discourse has taken on unprecedented intensity [7; 8]. The complexity of the research subject is due to the large number of participants in the logistics chain, the heterogeneity of transport modes, and the critical dependence on external force majeure factors.

Traditional approaches to quantitative risk assessment have long been based on the use of the Monte Carlo method. The essence of this method lies in running the model multiple times with random values for the input parameters. This allows one to obtain a probability distribution of the outcome and identify the most likely scenarios for

the development of events [9]. However, within the scope of this study, the Monte Carlo method has significant limitations. The reason for this is the lack of reliable statistical data. This is due to the fact that modern emergencies in Ukraine are of the ‘black swan’ type. They do not conform to retrospective statistical distributions, meaning that modeling based solely on historical data may lead to erroneous management decisions.

Instead, modern transport science is increasingly turning to fuzzy logic. This theory allows for the use of qualitative and imprecise data. According to recent research, the integration of fuzzy logic with multi-criteria decision-making (MCDM) methods, such as AHP (Analytic Hierarchy Process) and TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), enables the creation of highly robust and adaptive models for assessing the risks of disruptions in complex transport networks [10; 11].

The Fuzzy AHP method enables the structuring of a complex hierarchy of logistical risks using linguistic variables. These variables are subsequently transformed into triangular fuzzy numbers (TFN) for mathematical processing [12].

However, a systematic review of the existing literature shows that none of the published models simultaneously combines dynamic Bayesian analysis, fuzzy multi-criteria decision-making, and risk allocation based on Incoterms into a single unified system—especially one suitable for use in crisis conditions. This gap is the main research problem addressed by this study.

#### **Research Objectives**

The main objective of this study consists of three parts:

1. To develop and validate an integrated multi-criteria risk assessment model capable of functioning under conditions of extreme data scarcity;
2. To create a mathematical framework for allocating financial risks among participants in a multimodal supply chain in strict accordance with the Incoterms 2020 delivery terms;
3. Provide empirically grounded recommendations for route optimization for Ukrainian agricultural exporters based on current market data as of 2026.

#### **Main Research Results**

The integrated methodology employed in this study is built around three complementary analytical tools, each fulfilling a clearly defined and non-overlapping function within the overall risk assessment framework. Fuzzy AHP serves the role of a weighting engine: it processes expert pairwise comparisons of evaluation criteria (logistics cost, transit time, and security/insurance risk) under conditions of linguistic uncertainty and produces a normalised vector of criterion weights. Fuzzy TOPSIS then applies these weights to rank the alternative logistics routes by measuring their geometric proximity to the ideal positive and negative reference solutions, thereby producing an objective, multi-criteria ranking of alternatives. Dynamic Bayesian Networks (BN) address the third and most critical task: they quantify the probabilities of adverse risk events (cargo loss, infrastructure disruptions, logistical delays) under conditions of deep uncertainty, and continuously update these probabilities in real time as new evidence about the security situation, power grid status, or border congestion becomes available. This explicit division of methodological roles ensures that the framework functions as a coherent and mutually reinforcing integrated system, rather than an arbitrary combination of independent tools.

***A mathematical description of triangular fuzzy numbers (TFN) and the AHP algorithm.*** To eliminate the cognitive uncertainty of expert assessments, linguistic judgements are transformed into triangular fuzzy numbers  $\tilde{A}=(l,m,u)$ . Where  $l$  is the smallest possible value,  $m$  is the most probable value (the apex of the triangle), and  $u$  is the largest possible value [13].

The conversion of the experts' linguistic ratings into TFN values for this study is presented in Table 1 [12]. The expert group was formed based on strict selection criteria. Specifically, each candidate had to possess at least five years of documented practical or academic experience in maritime and multimodal logistics, alongside direct operational involvement in international freight management or transport risk assessment. Ultimately, the panel consisted of seven experts. This included two senior logistics managers from freight forwarding companies whose expertise lies in the containerization of export-import cargo flows and multimodal integration. The group also involved two foreign trade managers with a practical background in handling financial and contractual risks under Incoterms 2020. The remaining three members were academics from Ukrainian transport universities with over five years of active research in logistics risks, security, and decision-making under uncertainty. To verify the internal consistency of their collective judgments, the Consistency Ratio (CR) was calculated as the ratio of the Consistency Index (CI) to the Random Index (RI) [10]. The obtained CR value of 0.041 is well below the accepted threshold of 0.10, which confirms the statistical consistency and reliability of the provided evaluations.

Table 1

**Conversion scale for linguistic variables to triangular fuzzy numbers (TFN)**

Linguistic evaluation	Scale value	Triangular fuzzy number (l,m,u)
Equal importance	1	(1, 1, 1)
Slight preference	3	(2, 3, 4)
Moderate preference	5	(4, 5, 6)
Strong preference	7	(6, 7, 8)
Absolute preference	9	(8, 9, 9)

Based on this scale and the aggregation of expert judgements, a pairwise comparison matrix (Table 2) was developed for the three key route optimisation criteria:  $C_1$  (Total logistics costs),  $C_2$  (Transit time),  $C_3$  (Security and insurance risk).

Table 2

**Matrix of pairwise comparisons of criteria for the Fuzzy AHP algorithm**

Criterion	$C_1$ (Cost)	$C_2$ (Time)	$C_3$ (Risk)
$C_1$ (Cost)	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.00, 2.00, 3.00)	(0.25, 0.33, 0.50)
$C_2$ (Time)	(0.33, 0.50, 1.00)	(1.00, 1.00, 1.00)	(0.20, 0.25, 0.33)
$C_3$ (Risk)	(2.00, 3.00, 4.00)	(3.00, 4.00, 5.00)	(1.00, 1.00, 1.00)

*\*Note: The weights of the criteria were calculated using Fuzzy AHP software with a defuzzification method based on the 'Degree of Possibility' approach proposed by Chang (1996) [12], yielding  $W_{C1} = 0.28$ ,  $W_{C2} = 0.12$ ,  $W_{C3} = 0.60$ .*

After calculating the values of the fuzzy synthetic extent, the defuzzification method based on the Degree of Possibility (DOP) as proposed by Chang (1996) [12] is applied. This allows the fuzzy numbers to be converted into crisp criterion weights. As a result of defuzzification and normalisation, the final vector of crisp weights is obtained:  $W_{c1} = 0.28$ ,  $W_{c2} = 0.12$ ,  $W_{c3} = 0.60$ . The security and insurance risk criterion ( $W_{c3} = 0.60$ ) holds the dominant weight in the proposed model. The expert panel unanimously agreed on this prioritisation. Under active hostilities and port blockades, operational security is the least controllable factor in logistics planning. A single security incident can instantly wipe out any cost or time savings of a given route.

The volatility of Extra War Risk Insurance (EWRI) premiums in the Black Sea region further reinforces this assessment. Historically, these premiums spiked to 1.0–1.5% of the cargo value during peak instability. By comparison, the rate stood at 0.45% at the time of this study.

Logistics cost ( $W_{c1} = 0.28$ ) ranked second in importance. This reflects the heavy financial burden caused by forced rerouting and container demurrage. Finally, transit time ( $W_{c2} = 0.12$ ) received the lowest weight. Experts noted that predictable delivery schedules are practically unachievable in wartime. Consequently, transit time serves only as a secondary target for route optimisation.

In turn, the Fuzzy TOPSIS method is used to rank alternative logistics routes or strategies by simultaneously measuring the shortest geometric distance to the positive ideal solution (FPIS,  $d^+$ ) and the longest distance to the negative ideal solution (FNIS,  $d^-$ ) [14]. Furthermore, fuzzy synthetic evaluation methods demonstrate high effectiveness in formalising multidimensional risks in complex port operations and terminal logistics [11].

**The structure of a Bayesian network (BN).** The second fundamental pillar of the chosen methodology is the framework of dynamic Bayesian networks. Unlike static fault trees, Bayesian networks enable the dynamic updating of event probabilities as new evidence becomes available in real time [15; 16]. This is critically important for maritime logistics in emergency situations, where changes in the security situation in the water area must be instantly reflected in the risk assessment of the entire voyage.

To calculate the probability of a critical logistical failure ( $E$ ) at each section of the route, this study constructs a directed acyclic graph (DAG) [15]. The root nodes in the network are defined as:  $N_1$  (Intensity of kinetic attacks on infrastructure),  $N_2$  (Degree of damage to the power grid) and  $N_3$  (Level of logistical congestion at borders). The leaf node is  $E$  (Occurrence of delays or damage to cargo).

The relationships between these nodes are formalised using conditional probability tables (CPTs). The CPTs were populated based on a synthesis of historical statistical data and the expert assessments mentioned above (for example, the conditional probability of failure given high attack intensity and partial network destruction,  $P(E | N_1 = \text{High}, N_2 = \text{Moderate})$ , is 0.75) [16]. The marginal probability of failure is calculated using the total probability theorem. This allows the mathematical expectation of expected delays,  $E(\Delta T)$ , to be obtained [15].

A mathematical model for estimating financial losses. To formalise risks within multimodal transport under various Incoterms 2020 terms, we use the total risk function  $R_{total}$  [5]. The total financial risk for the exporter is determined by the extent of their liability at each stage of the logistics chain and the probability of adverse events occurring.

The probability of an undesirable event occurring is calculated using dynamic Bayesian networks (BN) [15].

The general formula for the expected financial losses ( $R$ ) for a single transport leg is as follows (Formula 1):

$$R = P(E) * V * L \quad (1)$$

where:

$P(E)$  – the posterior probability of a risk event occurring (force majeure, accident, damage), calculated using conditional probabilities within the BN structure [15];

$V$  – total value of the cargo consignment (Contract Value);

$L$  – loss severity coefficient, ranging from 0 to 1. In this study, a conservative value of  $L = 0.8$  is adopted for infrastructure damage (it is assumed that 20% of the residual value is retained in the form of scrap). **Important:** this  $L$  factor applies exclusively to the risk of physical loss of cargo, to avoid double counting of losses with the risk of time delays.

In addition to the risk of physical loss of cargo, the model specifically accounts for the financial risk associated with delays. In emergency situations, these delays result in significant losses due to the downtime of ships and railway wagons (Formula 2):

$$R_{time} = E(\Delta T) * C_{day} \quad (2)$$

where  $E(\Delta T)$  is the mathematical expectation of the time deviation from the schedule (in days), generated by a Bayesian network, and  $C_{day}$  is the cost of a single day of downtime. This indicator aggregates the total costs of demurrage, excess storage and the costs of maintaining the company's frozen capital.

Thus, a comprehensive integrated risk assessment model for an exporter using the DAP (Delivered at Place) term [5], under which the exporter bears maximum liability until the goods are handed over at the destination, is expressed as the sum of the risks across all stages of the multimodal route (Formula 3):

$$R_{DAP} = \sum_{i=1}^n (R_{s,i} + R_{time,s,i}) + (R_m + R_{time,m}) + EWRI \quad (3)$$

where  $R_{s,i}$  and  $R_{time,s,i}$  are the risks associated with the  $i$ -th inland transport segment (railway, terminal);

$R_m$  and  $R_{time,m}$  are the risks associated with the sea crossing;

$EWRI$  (Extra War Risk Insurance) – the premium for insurance against additional war risks. Under DAP terms, a rational seller is obliged to pay this premium, as they bear the physical risk for the cargo during sea transport.

By way of comparison, under the FOB (Free on Board) term [5], the exporter's risk is limited solely to the first part of the equation (up to the point at which the cargo crosses the ship's rail) (Formula 4):

$$R_{FOB} = \sum_{i=1}^n (R_{s,i} + R_{time,s,i}) \quad (4)$$

The proposed mathematical framework allows for a clear delineation of areas of financial vulnerability depending on the chosen contract terms. This is critical for ensuring the economic stability of an enterprise in emergency situations.

**Identifying and defining the information and empirical basis for conducting research.** Following the expiry of the 'grain deal' and Russia's withdrawal from

the Black Sea Grain Initiative, Ukraine independently launched a temporary maritime corridor. This not only enabled the resumption of export flows but also significantly stabilised the security situation for merchant vessels. As a result, this ensured that domestic agricultural produce could reach global markets on an industrial scale [17].

During this period, a radical restructuring of the modal composition of Ukrainian exports took place, accompanied by a gradual shift in focus from the Danube ports back to the deep-water ports of the Greater Odesa region (Odesa, Chornomorsk, Pivdennyi). As a result, their share in the overall structure of maritime exports has now stabilised at over 80% [18]. Land-based logistics routes through EU countries ('Solidarity Lanes') continue to serve as backup channels. However, at the start of their operation, the average waiting time for rail wagons at border infrastructure reached 16–30 days. This caused significant delays and substantially limited the throughput capacity of these routes [19].

To ensure the high reliability of the study's results, a standard consignment of food wheat weighing 12,500 tonnes was selected for testing. According to operational monitoring of prices on agricultural markets, the export value of Ukrainian wheat on FOB terms as of March 2026 is US\$231.40 per tonne [20]. Thus, the total contract value of the consignment ( $V$ ), included in the calculation is US\$2,892,500.

The cost of direct exports via the ports of Greater Odesa to key export markets (such as ports in Egypt or Turkey) includes inland rail logistics to the port of Chornomorsk. As of early 2026, this is estimated at around US\$625–630 per container [21], plus ocean freight. According to the current tariff schedules of liner operators, in particular Maersk, freight costs currently include special congestion surcharges (Congestion Fee Destination – CFD) [22].

Extra War Risk Insurance (*EWRI*) premiums remain a decisive factor in terms of safety and financial burden. During periods of peak military instability, these rates reached a critical level of 1.0%–1.5% of the value of the vessel and cargo. As of 2026, *EWRI* premiums for the ports of Greater Odesa have stabilised at 0.45%, owing to the successful operation of the maritime corridor and the implementation of special insurance programmes (in particular with the support of the UK government and Marsh McLennan) [23; 24]. As for the risks of time losses, penalties for the overdue detention of container equipment (detention) average US\$40 per day per unit [25].

***Practical verification of the risk assessment model using a specific example.*** To verify the mathematical framework developed, a practical test was conducted using a real-world case study of Ukrainian agricultural exports.

***Problem statement:***

An export company plans to ship a consignment of 500 TEU of wheat from a grain silo in the Kharkiv region to the port of Alexandria (Egypt). The total gross weight is approximately 12,500 tonnes (assuming a payload of 25 tonnes per TEU, which corresponds to typical weight restrictions). Although grain cargoes are traditionally transported by bulk carriers, the containerisation of agricultural products has increased significantly since 2022. This logistics solution allows exporters to diversify risks, avoid prolonged stockpiling at terminals during periods of shelling threats, and meet strict phytosanitary requirements for small consignments [4].

The cost of the cargo is US\$231.40 per tonne [20]; therefore, the total value of the consignment  $V$  is US\$2,892,500.

*Calculation of the daily demurrage cost ( $C_{day}$ ):*

For a shipment of 500 TEU, the total costs are clearly broken down into several components. Direct demurrage (at USD 40 per unit) amounts to USD 20,000 per day. The cost of capital is calculated based on the current NBU discount rate (15% per annum as of 2026 [26]). This generates approximately 1,188 USD in hidden losses per day. Adding the average port storage costs (around 312 USD), the total cost of one day of logistical downtime is set at  $C_{day} = 21,500$  USD.

The company's expert group is considering three alternative logistics routes:

**Route 1 ( $M_1$ ): Direct sea route.** Kharkiv → Rail/Road → Port of Chornomorsk → Sea → Alexandria. Inland transport to the port is estimated at 625 USD/TEU. Sea freight (including a 100 USD CFD from Maersk [22]) amounts to approximately 800 USD/TEU. Total: 1,425 USD/TEU. [21] EWRI insurance premium: 0.45% (13,016 USD).

**Route 2 ( $M_2$ ): Danube–Romanian.** Kharkiv → Railway → Port of Izmail → barge → Port of Constanța → sea → Alexandria. Inland transport and barge costs are estimated at around 1,200 USD/TEU, sea freight at 556 USD [27]. Total: 1,756 USD/TEU. EWRI : 0.15% (4,339 USD).

**Route 3 ( $M_3$ ): Overland via the EU.** Kharkiv → Railway → Polish border → Port of Gdańsk → Sea → Alexandria. Cross-border delivery – 1,450 USD, sea freight – 900 USD [27]. Total: 2,350 USD/TEU. EWRI : 0.15%.

**Stage 1. Ranking routes using the Fuzzy AHP-TOPSIS method**

Based on the experts' linguistic assessments and the calculated criterion weights ( $W_{c1} = 0.28$ ,  $W_{c2} = 0.12$ ,  $W_{c3} = 0.60$ ), a normalised matrix for the Fuzzy TOPSIS algorithm was constructed. It generates the following results for a 500 TEU shipment (Table 3). The algorithm calculates the shortest distance to the ideal positive solution (FPIS,  $d^+$ ) and the ideal negative solution (FNIS,  $d^-$ ). The final proximity coefficient ( $CC_i$ ) is defined as  $d^- / (d^+ + d^-)$  [14].

Table 3

**Calculation of distances and results of the ranking of alternative routes using the Fuzzy AHP-TOPSIS method**

Route	Logistics (USD)	Transit (days)	EWRI	Distance to FPIS	Distance to FNIS	Proximity coefficient	Rank
$M_1$ (Chornomorsk)	712,500	12	0.45%	2.21	5.54	0.715	1
$M_2$ (Constanța)	878,000	18	0.15%	3.26	4.49	0.580	2
$M_3$ (Gdańsk)	1,175,000	28	0.15%	5.85	1.90	0.245	3

**Stage 2. Allocation of risks under Incoterms 2020**

For the optimal route  $M_1$ , we will analyse the total financial risk depending on the delivery basis. Based on the results of the Bayesian network, the marginal posterior probabilities of critical failures are determined as:  $P(E_s) = 0.01672$  (for land transit) and  $P(E_m) = 0.0424$  (for sea transit). The residual value retention factor is  $L = 0.8$ . According to the network topology, the mathematical expectation of the time deviation is  $E(\Delta T_s) = 1.44$  days (land) and  $E(\Delta T_m) = 2.50$  days (sea).

Step-by-step assessment of financial risks:

1. **Time risk (Inland):**  $1.44 * 21,500 = 30,960$  USD.
2. **Physical loss risk (Inland):**  $2,892,500 * 0.01672 * 0.8 \approx 38,690$  USD.
3. **Time risk (Sea):**  $2.50 * 21,500 = 53,750$  USD.
4. **Physical loss risk (Sea):**  $2,892,500 * 0.0424 * 0.8 \approx 98,110$  USD.
5. **Insurance cost (EWRI):**  $2,892,500 * 0.0045 = 13,016$  USD.

The detailed breakdown of these financial risks across different delivery bases is summarized in Table 4.

Table 4

**Calculation of the seller's total financial risk under Incoterms (in US dollars)**

Route stage / Basis	Rail and port risk (Time + Loss)	Marine risk (Time + Loss)	Insurance costs (EWRI)	Total risk	% of contract
FOB Chornomorsk	69,650	0	0	69,650	2.41 %
CIF Alexandria	69,650	0*	13,016	82,666	2.86 %
DAP Alexandria	69,650	151,860	13,016	234,526	8.11 %

\*Note: Under CIF terms, the seller pays only for minimum cargo insurance (EWRI). However, the physical risk and the risk of delay at sea legally pass to the buyer at the moment of loading onto the vessel. Therefore, for the seller, these risks are zero [5].

To validate the stability of the proposed model, a sensitivity analysis was performed across three stress scenarios. The details of this analysis and the corresponding risk fluctuations are presented in Table 5. The results confirm that the optimal ranking of Incoterms bases remains robust even under extreme conditions. Doubling transit delays or increasing EWRI premiums to historical peaks does not change the final strategic choice. This stability demonstrates that the integrated methodology provides a reliable foundation for decision-making in crisis conditions.

Table 5

**Sensitivity analysis: Total financial risk of the exporter under Incoterms 2020 across three stress scenarios (Route M1, USD)**

Incoterms Basis	Scenario 1 (Base): EWRI=0.45%, standard delays	Scenario 2: EWRI=1.0%, delays +50%	Scenario 3: EWRI=1.5%, delays +100%
FOB Chornomorsk	69,650 (2.41%)	85,130 (2.94%)	100,610 (3.48%)
CIF Alexandria	82,666 (2.86%)	114,055 (3.94%)	143,998 (4.98%)
DAP Alexandria	234,526 (8.11%)	292,790 (10.12%)	349,608 (12.09%)

Note: Scenario 2 assumes EWRI rises to 1.0% (documented peak during acute hostilities) and expected delays increase by 50% ( $E(\Delta T_s) = 2.16$  days;  $E(\Delta T_m) = 3.75$  days). Scenario 3 assumes EWRI at the historical maximum of 1.5% with delays doubled ( $E(\Delta T_s) = 2.88$  days;  $E(\Delta T_m) = 5.00$  days). Physical loss probabilities ( $P(E_s) = 0.01672$ ;  $P(E_m) = 0.0424$ ) and the loss severity coefficient ( $L = 0.8$ ) remain constant across all scenarios. The results confirm that the rank ordering  $FOB < CIF < DAP$  is fully preserved under all stress conditions, and that the absolute risk magnitude scales proportionally with the parameter changes, demonstrating the structural robustness of the proposed model.

Analytical conclusion: Signing a contract on DAP Alexandria terms increases the exporter's financial risk to USD 234,526 (8.11%). This is because the exporter assumes full legal and operational responsibility for the sea leg. FOB is the optimal

choice in terms of risk minimisation. However, CIF remains the compromise solution in practice.

#### **Discussion of Results**

The scientific novelty of the research presented in this article lies in the following:

An integrated model for the analytical assessment of risks in maritime multimodal transport has been refined and adapted to crisis conditions. It algorithmically combines the apparatus of dynamic Bayesian networks (for calculating probabilities under the uncertainty of a crisis environment) and the Fuzzy AHP-TOPSIS method (for mitigating expert uncertainty in decision-making). The limitations of the Monte Carlo method are substantiated. The advantages of the proposed approach in the absence of normal distributions are argued.

The mathematical method for allocating financial and operational risks has been refined through the implementation of the Incoterms 2020 international rules. This has made it possible to translate the purely legal provisions of international trade into precise engineering and economic calculations. It has also helped to clearly assess the exporter's financial exposure at every stage of the multimodal route.

The methodology for spatial-route optimisation of Ukraine's export logistics has been further developed through the introduction of the dynamic EWRI indicator as a security risk criterion into the Fuzzy TOPSIS function. A scientific and mathematical justification was carried out based on the analysis of current data as of 2026. It was found that, thanks to the stabilisation of insurance premiums at 0.45%, routes via the deep-water ports of Greater Odesa are optimal in terms of the integrated cost and time criterion compared to western land crossings and Danube ports.

#### **Conclusions**

Based on the in-depth analytical study conducted, the following conceptual conclusions can be drawn:

Hostilities, unprecedented geopolitical tensions and port blockades have fundamentally disrupted the traditional paradigms of logistics planning in the Azov-Black Sea basin. It has been established that risk management in multimodal supply chains under conditions of permanent force majeure cannot rely on linear deterministic approaches or simulation models of the past.

The use of Bayesian networks allows for the continuous updating of the assessment of failure probabilities in real time based on the emergence of new evidence (for example, damage to the power grid or border closures by neighbouring states). This significantly increases the reliability of forecasting logistical deviations. The application of fuzzy logic tools (the Fuzzy AHP-TOPSIS algorithm) to compare alternative export routes has confirmed the fundamental economic viability of the new Ukrainian maritime corridor.

Despite the existence of premiums for additional security risks, the overall time and cost losses on direct shipments from the ports of Greater Odesa are significantly lower than the weeks-long delays at congested land borders with the EU or the additional costs of intermediate river transshipment. The reduction and stabilisation of insurance rates for additional security risks (EWRI) to 0.45% [23] became the critical factor that mathematically confirmed the advantage of the sea route ( $CC_i = 0.715$ ).

It has been mathematically proven that the choice of Incoterms 2020 terms is no less critical than the choice of the physical transport route. Practical testing has clearly

demonstrated that an exporter's switch from the safe FOB basis to the DAP basis for a standard grain consignment (500 TEU) increases the extent of their potential financial risk in the event of an emergency by more than three times (from 2.41% to 8.11% of the contract value) [5].

The integration of risk distribution functions into the developed mathematical model provides a solid engineering foundation for the creation of specialised automated software. The further development of such a software product, capable of integrating API data and a Bayesian engine into a single interface, represents an extremely promising avenue for applied research within the framework of the development of domestic transport technologies.

Future research should focus on developing an automated software tool for decision support. Such a tool should integrate real-time API data streams. This data includes current freight rates, EWRI premiums, and border congestion indicators. Data integration should be carried out within the framework of a Bayesian inference mechanism. This will ensure continuous and dynamic risk recalculation. The results obtained can be used by logistics operators to make informed decisions.

#### BIBLIOGRAPHY

1. UNCTAD. Review of Maritime Transport 2021. URL: <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2021> (дата звернення: 07.04.2026).
2. Кабінет Міністрів України. Деблокада портів: досягнуто домовленості про експорт продовольства з портів Одеса, Чорноморськ та Південний. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/deblokada-portiv-dosiahnuto-domovlenosti-pro-eksport-prodovolstva-z-portiv-odesa-chornomorsk-ta-pivdennyi> (дата звернення: 07.04.2026).
3. United Nations. Convention on International Multimodal Transport of Goods. Geneva, 1980. URL: [https://unctad.org/system/files/official-document/tdmtconf17\\_en.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/tdmtconf17_en.pdf) (дата звернення: 07.04.2026).
4. Yanovska V., Król M., Pittman R. The logistics of grain exports from wartime Ukraine: What are the highest priority areas to address? *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2025. Vol. 30. Art. 101363. DOI: 10.1016/j.trip.2025.101363.
5. Incoterms 2020. International Chamber of Commerce (ICC). URL: <https://iccwbo.org/business-solutions/incoterms-rules/incoterms-2020/> (дата звернення: 07.04.2026).
6. Caplice C., Sheffi Y., Gordon G. Hidden Supply Chain Risk and Incoterms®: Analysis and Mitigation Strategies. *Journal of Risk and Financial Management*. 2021. Vol. 14, № 12. Art. 619. DOI: 10.3390/jrfm14120619.
7. Notteboom T., Haralambides H., Cullinane K. The costs of maritime supply chain disruptions: The case of the Suez Canal blockage by the 'Ever Given' megaship. *International Journal of Production Economics*. 2025. DOI: 10.1016/j.ijpe.2024.109321.

8. Rodríguez-Díaz A. et al. Challenges and Security Risks in the Red Sea: Impact of Houthi Attacks on Maritime Traffic. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, № 11. Art. 1900. DOI: 10.3390/jmse12111900.
9. Mun J. Modeling Risk: Applying Monte Carlo Simulation, Real Options Analysis, Forecasting, and Optimization Techniques. *John Wiley & Sons*, 2006. 623 p. ISBN: 978-0-471-78900-0.
10. Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. McGraw-Hill, 1980. 287 p.
11. Samhoury M., Abualeenein M., Al-Atrash F. Enhancing Supply Chain Resilience Through a Fuzzy AHP and TOPSIS to Mitigate Transportation Disruption. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, № 16. Art. 7375. DOI: 10.3390/su17167375.
12. Chang D.-Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*. 1996. Vol. 95, № 3. P. 649–655. DOI: 10.1016/0377-2217(95)00300-2.
13. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. Vol. 8, № 3. P. 338–353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
14. Hwang C. L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Springer-Verlag, 1981. DOI: 10.1007/978-3-642-48318-9.
15. Pearl J. Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference. Morgan Kaufmann, 1988. 552 p.
16. Kabir S., Papadopoulos Y. Applications of Bayesian networks and Petri nets in safety, reliability, and risk assessments: A review. *Safety Science*. 2019. Vol. 115. P. 154–175. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.02.009.
17. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Brief on the interruption of the Black Sea Grain Initiative. Rome : FAO, 2023. URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6c9395e2-a199-4df5-a2f2-620e960512e0/content> (дата звернення: 07.04.2026).
18. USDA Agricultural Marketing Service. Ukraine Grain Transportation Report. June 2025. URL: <https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/UkraineJune2025.pdf> (дата звернення: 07.04.2026).
19. European Commission. An Action Plan for EU-Ukraine Solidarity Lanes to facilitate Ukraine's agricultural exports and bilateral trade with the EU. Brussels, 2022. URL: [https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/european-commission-establish-solidarity-lanes-help-ukraine-export-agricultural-goods-2022-05-12\\_en](https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/european-commission-establish-solidarity-lanes-help-ukraine-export-agricultural-goods-2022-05-12_en) (дата звернення: 07.04.2026).
20. Fastmarkets. Wheat price commentary: Futures rally on tight Black Sea supply, steady premiums. March 2026. URL: <https://www.fastmarkets.com/insights/wheat-price-commentary-futures-rally-on-tight-black-sea-supply-steady-premiums/> (дата звернення: 07.04.2026).
21. Minprom.ua. Maersk оновила тарифи на контейнерні перевезення до України. 2025. URL: <https://minprom.ua/news/325785.html> (дата звернення: 07.04.2026).

22. Maersk. Congestion Fee Destination (CFD) World to Chornomorsk, Ukraine. February 2026. URL: <https://www.maersk.com/news/articles/2026/02/13/congestion-fee-destination-chornomorsk-ukraine> (дата звернення: 07.04.2026).
23. Lloyd's Market Association. Joint War Committee: Hull War, Strikes, Terrorism and Related Perils Listed Areas. 2025. URL: [/https://www.lmalloyds.com/LMA/News/LMA\\_bulletins/LMA\\_Bulletins/JWC\\_Hull\\_Listed\\_Areas.aspx](https://www.lmalloyds.com/LMA/News/LMA_bulletins/LMA_Bulletins/JWC_Hull_Listed_Areas.aspx) (дата звернення: 07.04.2026).
24. Marsh McLennan. Unity Insurance Facility Expanded to Cover All Shipping to and from Ukrainian Ports. March 2024. URL: <https://www.marshmclennan.com/news-events/2024/march/unity-insurance-facility-expanded-to-cover-all-shipping-to-and-from-Ukrainian-ports.html> (дата звернення: 07.04.2026).
25. Maersk. Ukraine Exports: Demurrage and Detention Tariff. 2026. URL: <https://www.maersk.com/local-information/europe/ukraine/export> (дата звернення: 07.04.2026).
26. Національний банк України. Рішення про зниження облікової ставки до 15%. 2026. URL: <https://bank.gov.ua/ua/news/all/natsionalniy-bank-ukrayini-zniziv-oblikovu-stavku-do-15> (дата звернення: 07.04.2026).
27. Freightos Baltic Index (FBX). Container Freight Rate Index. February 2026. URL: <https://terminal.freightos.com/freightos-baltic-index-global-container-pricing-index/> (дата звернення: 07.04.2026).

#### REFERENCES

1. UNCTAD. (2021). Review of Maritime Transport 2021. <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2021>.
2. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2022). Unblocking of ports: Agreements reached on food exports from Odesa, Chornomorsk and Pivdennyi ports [Deblokada portiv: dosiahnuto domovlenosti pro eksport prodovolstva z portiv Odesa, Chornomorsk ta Pivdennyi]. <https://www.kmu.gov.ua/news/deblokada-portiv-dosiahnuto-domovlenosti-pro-eksport-prodovolstva-z-portiv-odesa-chornomorsk-ta-pivdennyi> [in Ukrainian].
3. United Nations. (1980). Convention on International Multimodal Transport of Goods. [https://unctad.org/system/files/official-document/tdmtconf17\\_en.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/tdmtconf17_en.pdf).
4. Yanovska, V., Król, M., & Pittman, R. (2025). The logistics of grain exports from wartime Ukraine: What are the highest priority areas to address? *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 30, 101363. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101363>.
5. International Chamber of Commerce. (2020). Incoterms 2020. <https://iccwbo.org/business-solutions/incoterms-rules/incoterms-2020/>.
6. Caplice, C., Sheffi, Y., & Gordon, G. (2021). Hidden supply chain risk and Incoterms®: Analysis and mitigation strategies. *Journal of Risk and Financial Management*, 14(12), 619. <https://doi.org/10.3390/jrfm14120619>.

7. Notteboom, T., Haralambides, H., & Cullinane, K. (2025). The costs of maritime supply chain disruptions: The case of the Suez Canal blockage by the 'Ever Given' megaship. *International Journal of Production Economics*. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109321>.
8. Rodríguez-Díaz, A., et al. (2024). Challenges and security risks in the Red Sea: Impact of Houthi attacks on maritime traffic. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(11), 1900. <https://doi.org/10.3390/jmse12111900>.
9. Mun, J. (2006). *Modeling risk: Applying Monte Carlo simulation, real options analysis, forecasting, and optimization techniques*. John Wiley & Sons.
10. Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill.
11. Samhouri, M., Abualeenein, M., & Al-Atrash, F. (2025). Enhancing supply chain resilience through a Fuzzy AHP and TOPSIS to mitigate transportation disruption. *Sustainability*, 17(16), 7375. <https://doi.org/10.3390/su17167375>.
12. Chang, D.-Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95(3), 649–655. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00300-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00300-2).
13. Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).
14. Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>.
15. Pearl, J. (1988). *Probabilistic reasoning in intelligent systems: Networks of plausible inference*. Morgan Kaufmann.
16. Kabir, S., & Papadopoulos, Y. (2019). Applications of Bayesian networks and Petri nets in safety, reliability, and risk assessments: A review. *Safety Science*, 115, 154–175. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.009>.
17. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *Brief on the interruption of the Black Sea Grain Initiative*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6c9395e2-a199-4df5-a2f2-620e960512e0/content>.
18. USDA Agricultural Marketing Service. (2025, June). *Ukraine grain transportation report*. <https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/UkraineJune2025.pdf>.
19. European Commission. (2022). *An action plan for EU-Ukraine Solidarity Lanes to facilitate Ukraine's agricultural exports and bilateral trade with the EU*. [https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/european-commission-establish-solidarity-lanes-help-ukraine-export-agricultural-goods-2022-05-12\\_en](https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/european-commission-establish-solidarity-lanes-help-ukraine-export-agricultural-goods-2022-05-12_en).
20. Fastmarkets. (2026, March). *Wheat price commentary: Futures rally on tight Black Sea supply, steady premiums*. <https://www.fastmarkets.com/insights/wheat-price-commentary-futures-rally-on-tight-black-sea-supply-steady-premiums/>.

21. Minprom.ua. (2025). Maersk updated container shipping tariffs to Ukraine [Maersk onovyla taryfy na konteinerni perevezennia do Ukrainy]. <https://minprom.ua/news/325785.html> [in Ukrainian].
22. Maersk. (2026, February). Congestion Fee Destination (CFD) World to Chornomorsk, Ukraine. <https://www.maersk.com/news/articles/2026/02/13/congestion-fee-destination-chornomorsk-ukraine>.
23. Lloyd's Market Association. (2025). Joint War Committee: Hull war, strikes, terrorism and related perils listed areas. [https://www.lmalloyds.com/LMA/News/LMA\\_bulletins/LMA\\_Bulletins/JWC\\_Hull\\_Listed\\_Areas.aspx](https://www.lmalloyds.com/LMA/News/LMA_bulletins/LMA_Bulletins/JWC_Hull_Listed_Areas.aspx).
24. Marsh McLennan. (2024, March). Unity Insurance Facility expanded to cover all shipping to and from Ukrainian ports. <https://www.marshmclennan.com/news-events/2024/march/unity-insurance-facility-expanded-to-cover-all-shipping-to-and-from-Ukrainian-ports.html>.
25. Maersk. (2026). Ukraine exports: Demurrage and detention tariff. <https://www.maersk.com/local-information/europe/ukraine/export>.
26. National Bank of Ukraine. (2026). Decision to reduce the discount rate to 15% [Rishennia pro znyzhennia oblikovoi stavky do 15%]. <https://bank.gov.ua/ua/news/all/natsionalniy-bank-ukrayini-zniziv-oblikovu-stavku-do-15> [in Ukrainian].
27. Freightos Baltic Index. (2026, February). Container Freight Rate Index. <https://terminal.freightos.com/freightos-baltic-index-global-container-pricing-index/>.

Дата першого надходження статті до видання: 15.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 01.07.2026

**МЕТОДИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ЩОДО ОЦІНЮВАННЯ  
МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ЛАНЦЮГІВ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ  
З АВІАЦІЙНОЮ СКЛАДОВОЮ**

**О.Є. Соколова**

к.е.н., доцент, доцент кафедри транспортних технологій і систем,  
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна  
ORCID ID: 0000-0001-6341-0195

**Анотація**

Довготривала війна в Україні, геополітична нестабільність на Близькому Сході, санкційні транспортні обмеження та заборони стали причинами зміни просторової структури глобальних ланцюгів постачання, збільшення протяжності маршрутів та перевантаження транспортно-логістичної інфраструктури європейських країн. У цих умовах зростає роль мультимодальних ланцюгів доставки вантажів як функціональних підсистем інтегрованих транспортно-логістичних систем (ІТЛС) у межах яких переміщення вантажу від пункту відправлення до пункту призначення здійснюється із залученням декількох видів транспорту, зокрема авіаційного. Саме авіаційний транспорт забезпечує скорочення тривалості перевезення та підвищує гнучкість транспортно-логістичних рішень, що має особливе значення під час доставки гуманітарних, медичних, швидкопсувних вантажів та товарів з коротким життєвим циклом. Встановлено, що наявні наукові підходи зосереджені переважно на окремих аспектах управління ланцюгами постачання, використання авіаційного транспорту у логістичних схемах доставки вантажів, екологічних характеристиках перевезень та імітаційному моделюванні транспортно-логістичних процесів, проте недостатньо висвітлюють питання ефективності мультимодальних рішень з авіаційним сегментом.

У статті розроблено методичні положення оцінювання мультимодальних ланцюгів доставки вантажів з авіаційною складовою на основі їх мережевої структуризації в межах ІТЛС, з урахуванням вартісних, часових та екологічних характеристик транспортно-логістичного циклу. Обґрунтовано, що часові параметри окремих транспортно-логістичних процедур, насамперед в аеропортових вузлах, мають стохастичну природу, тому для визначення ймовірності виконання перевізного процесу в межах заданого інтервалу доцільно застосовувати імітаційне моделювання.

Для апробації запропонованих методичних положень у програмному середовищі AnyLogistix розроблено імітаційну модель ланцюга доставки вантажів між Шанхаєм та Києвом, для якої сформовано альтернативні варіанти перевезення із різним поєднанням видів транспорту на окремих ділянках маршруту. Результати моделювання показали, що залучення авіаційного транспорту суттєво скорочує тривалість доставки, проте супроводжується зростанням витрат та екологічного навантаження, що свідчить про необхідність врахування не лише прямих

транспортних витрат на етапі оцінювання ефективності таких ланцюгів, а й непрямих економічних ефектів, пов'язаних з тривалістю повного транспортно-логістичного циклу, оборотністю ресурсів та часовою чутливістю вантажопотоків. Отримані дані підтвердили можливість використання запропонованого підходу для оцінювання альтернативних схем доставки вантажів, зокрема чутливих до тривалості перевезення, в умовах нестабільного середовища та інфраструктурних обмеженнях. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення концептуальних положень багатокритеріальної оптимізації структури мультимодального ланцюга доставки в ІТЛС із застосуванням структурно-функціонального підходу.

**Ключові слова:** інтегрована транспортно-логістична система, мультимодальний ланцюг доставки вантажів, авіаційний транспорт, мережева структура, вартісні, часові та екологічні показники, імітаційне моделювання, AnyLogistix.

## METHODOLOGICAL FRAMEWORK FOR EVALUATING MULTIMODAL CARGO DELIVERY CHAINS WITH AN AIR TRANSPORT COMPONENT

**O.Ye. Sokolova**

PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Transport Technologies and Systems Department,  
State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine  
ORCID ID: 0000-0001-6341-0195

### **Summary**

*The prolonged war in Ukraine, geopolitical instability in the Middle East, transport sanctions, and restrictions have caused changes in the spatial structure of global supply chains, increased route lengths, and overloaded the transport and logistics infrastructure of European countries. Under these conditions, the role of multimodal cargo delivery chains as functional subsystems of integrated transport and logistics systems (ITLS) is increasing, within which cargo is transported from the point of origin to the destination using several modes of transport, including air transport. Air transport ensures shorter transit times and enhances the flexibility of transport and logistics decisions, which is particularly important for the delivery of humanitarian, medical, and perishable cargoes, as well as goods with a short life cycle. It has been found that existing scientific approaches are mainly focused on individual aspects of supply chain management, the use of air transport in logistics delivery schemes, the environmental characteristics of transportation, and the simulation modeling of transport and logistics processes, but they do not sufficiently address the efficiency of multimodal solutions with an air segment.*

*The article proposes a methodological framework for evaluating multimodal cargo delivery chains with an air transport component based on their network structuring within integrated transport and logistics systems, with due regard to the cost, time, and environmental characteristics of the transport and logistics cycle. It is shown that the time parameters of individual transport and logistics procedures, especially at airport nodes, are stochastic in nature; therefore, simulation modeling is used to estimate the probability of completing the transportation process within a given time interval.*

*To test the proposed methodological provisions, a simulation model of a cargo delivery chain between Shanghai and Kyiv was developed in the AnyLogistix software environment, for which alternative transportation options with different combinations of transport modes along individual route segments were generated. The simulation results showed that the use of air transport significantly reduces delivery time, but is accompanied by increased costs and environmental burden, which indicates the need to take into account not only direct transport costs when assessing the efficiency of such chains, but also indirect economic effects related to the duration of the full transport and logistics cycle, resource turnover, and the time sensitivity of cargo flows. The experimental findings confirmed the possibility of using the proposed approach to evaluate alternative cargo transportation schemes, particularly those involving time-sensitive cargo, under conditions of operational instability and infrastructure constraints. Further research should be aimed at developing conceptual provisions for multicriteria optimization of the structure of a multimodal delivery chain in ITLS using a structural-functional approach.*

**Key words:** *integrated transport and logistics system, multimodal cargo delivery chain, air transport, network structure, cost, time and environmental indicators, simulation modeling, AnyLogistix.*

**Вступ.** Функціонування інтегрованих транспортно-логістичних систем (ІТЛС) у нестабільному зовнішньому середовищі підвищує роль мультимодальних технологій організації перевезень, що забезпечують узгоджену взаємодію різних видів транспорту, інфраструктурних елементів та технологічних процедур у межах єдиного транспортно-логістичного процесу. При цьому, ефективність ІТЛС визначається не лише техніко-технологічними параметрами окремих її ланок, а й рівнем координації організаційних рішень, синхронізації вантажопотоків та раціональністю розподілу ресурсів. Разом з тим, необхідною передумовою результативної діяльності ІТЛС є дотримання принципів сталого розвитку, що передбачає збалансування економічних, екологічних та соціальних орієнтирів та потребує включення екологічних обмежень безпосередньо до процесів транспортування, перевалки, зберігання, та обробки вантажів.

Практична реалізація наведених вище положень пов'язана з формуванням мультимодальних ланцюгів доставки вантажів як функціональних підсистем ІТЛС, у межах яких забезпечується переміщення вантажу від пункту відправлення до пункту призначення із залученням, як правило, декількох видів транспорту. Вагоме значення у таких ланцюгах має авіаційний транспорт, завдяки якому досягається скорочення тривалості перевізного процесу, підвищується гнучкість транспортно-логістичних рішень, що стає критично важливим, зокрема при обмеженій доступності повітряного простору, для здійснення прямої доставки гуманітарних, медичних, швидкопсувних вантажів, а також товарів з коротким життєвим циклом, що є особливо актуальним сьогодні для України. У цьому випадку аеропортові комплекси виконують функції не тільки інфраструктурних об'єктів, де здійснюється перевалка вантажів, але й стають ключовими вузловими елементами координації та синхронізації транспортних потоків у структурі мультимодальних схем транспортування.

Звідси виходить, що мультимодальний логістичний ланцюг доцільно розглядати як структурно організовану послідовність узгоджених процесів, завдяки

яким відбувається доставка вантажу між заданими пунктами з урахуванням техніко-технологічних, організаційних, ресурсних, а також екологічних обмежень, що визначають параметри взаємодії різних видів транспорту та вузлових системоутворювальних елементів ІТЛС.

Саме тому, представлення мультимодального ланцюга у такому вигляді потребує його структуризації з позицій просторової організації ІТЛС, що передбачає виокремлення його функціональних компонентів та встановлення формалізованих зв'язків між ними.

Концептуальною основою, при цьому, мають стати підходи, що не обмежуються використанням узагальнених інтегральних показників, агрегація яких призводить до втрати інформації, потрібної для проведення багатокритеріального аналізу, а також передбачають деталізовану параметризацію елементів транспортно-логістичного простору, що відображає багатofакторність мультимодальних ланцюгів доставки з авіаційною складовою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблеми організації ланцюгів постачання в умовах зростання невизначеності зовнішнього середовища, цифровізації та ускладнення взаємодії між окремими учасниками транспортно-логістичних процесів належать до важливих напрямів сучасних наукових досліджень. Так, методологічні основи управління ланцюгами постачання як ключової концепції процесів перевезення вантажів детально досліджуються в роботі С. Чопри та П. Майндла [1]. У свою чергу, Р. Меркерт підкреслює зростання значення авіаційного вантажного сегменту при проектуванні логістичних ланцюгів, особливо під впливом пандемічних обмежень, геополітичних викликів, розвитку електронної комерції та глобальних криз [2]. При цьому, К. Вонсовська визначає авіаційний транспорт, як один із основних елементів ланцюга доставки, що здатний забезпечувати його швидкість, гнучкість та адаптивність [3].

З метою оцінювання ефективності ланцюгів, що обслуговуються авіакомпаніями автором наукової праці [4] розроблено методику, що надає можливість враховувати інфраструктурні, операційні, економічні та екологічні чинники, що впливають на розвиток авіаційних вантажних перевезень. Разом з цим, українськими вченими І. Борець, О. Соколовою, О. Соловійовою та І. Висоцькою запропоновано теоретико-практичні положення застосування елементів мережевого планування та критеріїв прийняття рішень для вибору раціональної транспортно-технологічної схеми доставки вантажів за показниками вартості та часу [5].

Також, серед науковців значний інтерес викликають питання, присвячені сталому розвитку ланцюгів постачання із залученням авіаційного транспорту. Зокрема, авторами роботи [6] обґрунтовуються методичні засади проектування сталих ланцюгів та оптимізації взаємодії авіаційного та наземних видів транспорту на базі аеропортових комплексів. У праці [7] вивчається специфіка впливу авіаційних послуг на довкілля та пропонується модель заміни повітряних суден авіакомпанії на більш економічні типи літаків, що сприяє скороченню екологічного навантаження, та є важливим під час оцінювання транспортно-логістичних рішень.

Відзначимо, що у науковій літературі приділяється окрема увага застосуванню імітаційного моделювання для оптимізації та аналізу ланцюгів постачання. Так, С. Кім, Й. Чхой та С. Кім [8], а також Ц. Лю, Р. Ширакаші, Р. Камієбісу, Т. Ніші

та М. Мацуди [9] використовують даний інструмент для оцінювання ефективності альтернативних ланцюгів доставки та прийняття відповідних управлінських рішень. У праці [10] розроблено імітаційну модель, що дозволяє оптимізувати регіональну мережу ланцюгів постачання вантажів через логістичний аеропортовий хаб, зокрема з погляду скорочення витрат, зменшення порожніх пробігів автомобілів та підвищення адаптивності мережі до коливань попиту, але при цьому запропонований методичний апарат обмежується наземним сегментом транспортування та не враховує його інтеграцію з авіаційною складовою в межах єдиного ланцюга.

Отже, наведені наукові праці відображають різні аспекти дослідження ланцюгів постачання та мультимодальних перевезень, на основі яких можна виокремити основні методичні підходи, що застосовуються для оцінювання мультимодальних ланцюгів доставки вантажів. Зокрема, одним із найпоширеніших є вартісно-часовий метод, у межах якого альтернативні транспортно-технологічні схеми порівнюються за витратами перевезення, тривалістю доставки, витратами на перевалку, зберігання та виконання інших логістичних операцій [4,5]. Мережевий підхід передбачає формалізацію транспортно-логістичної системи як сукупності вузлів та зв'язків між ними та вибір оптимального маршруту за одним або декількома критеріями [5,9,10]. Окремі праці присвячені визначенню негативного впливу окремих видів транспорту на довкілля та обґрунтування рішень щодо зменшення екологічного навантаження [6,7]. Також, для дослідження поведінки складних транспортно-логістичних систем та процесів при змінних параметрах попиту, пропускної спроможності, тривалості технологічних процедур та режимів роботи окремих об'єктів інфраструктури активно використовується імітаційне моделювання [8-10].

Таким чином, проведений аналіз останніх досліджень свідчить про наявність значної кількості наукових публікацій в області управління ланцюгами постачання, залучення авіаційного транспорту до логістичних схем доставки вантажів, екологічних аспектів перевезень та застосування імітаційного моделювання транспортно-логістичних процесів. Проте зазначені методичні підходи у більшості робіт переважно розглядаються відокремлено. Так, вартісно-часові методики не завжди охоплюють екологічну складову, а імітаційні моделі здебільшого орієнтовані на окремі ланки логістичного ланцюга або наземний сегмент перевезення. Тому, недостатньо розкритими залишаються питання методичного забезпечення мережевої структуризації мультимодального ланцюга доставки вантажів з авіаційною складовою, комплексного оцінювання його вартісних, часових та екологічних характеристик, а також імітаційної перевірки альтернативних сценаріїв перевезення в умовах обмеженої доступності авіатранспортної інфраструктури. Саме це і обумовлює актуальність поставленої у даній роботі наукової проблеми та створює основу для її детального вивчення.

**Формулювання мети дослідження.** Метою статті є розроблення методичних положень щодо оцінювання мультимодальних ланцюгів доставки вантажів з авіаційною складовою на основі їх мережевої структуризації в межах ІТЛС, комплексного врахування вартісних, часових та екологічних характеристик транспортно-логістичного циклу, а також імітаційного моделювання альтернативних варіантів перевезення.

Для досягнення поставленої мети у цьому дослідженні поставлено та вирішуються такі завдання:

1) формалізувати структуру мультимодального ланцюга доставки вантажів з авіаційною складовою в межах ІТЛС із використанням мережевого підходу та визначити систему вартісних, часових та екологічних показників його оцінювання;

2) розробити імітаційну модель альтернативних варіантів перевезення вантажів з урахуванням стохастичної природи часових параметрів окремих транспортно-логістичних процедур;

3) провести порівняльний сценарний аналіз альтернативних схем доставки вантажів за вартісними, часовими та екологічними критеріями.

**Виклад основного матеріалу.** Просторову структуру ІТЛС доцільно формалізувати за допомогою мережевого підходу, що дозволяє відтворювати взаємозв'язки між інфраструктурними складовими системи та альтернативними варіантами перевезення вантажопотоків у вигляді орієнтованого графа [6]:

$$g = (N, A), \quad (1)$$

де множина вершин  $N$  відповідає вузловим елементам системи, до складу яких належать логістичні центри, транспортні термінали та аеропортові комплекси, тоді як множина дуг  $A$  відображає можливі маршрути переміщення вантажів між ними із використанням різних видів транспорту (рис. 1). Кожна дуга графа  $g = (N, A)$  задається впорядкованою парою індексів  $(i, j)$ , при  $i, j \in \{1, \dots, N\}$ , що відповідають вузлам  $n_i$  та  $n_j$ , а умова  $(i, j) \in A$  означає наявність транспортного зв'язку між ними.

Сукупність дуг відображає можливі варіанти переміщення вантажів між ланками ланцюга доставки із залученням одного або декількох видів транспорту та утворює множину альтернативних схем організації мультимодальних перевезень.

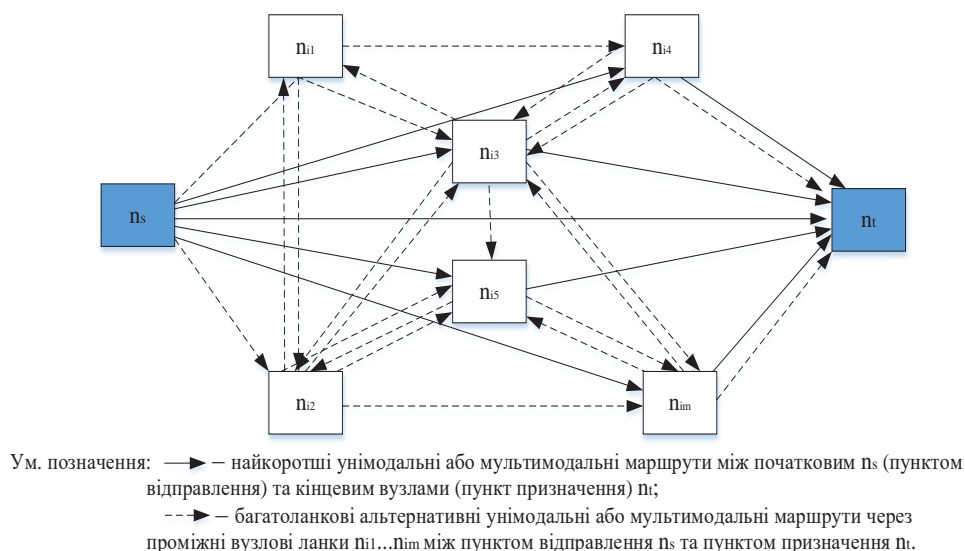


Рис. 1. Мережева структура ІТЛС (розроблено автором)

У контексті поставленої задачі мультимодальний ланцюг доставки вантажів (МЛДВ) може бути представлений у вигляді упорядкованої послідовності вузлів:

$$L = (n_s, n_{i_1}, n_{i_2}, \dots, n_{i_m}, \dots, n_t), \quad (2)$$

де  $n_s$  – початковий вузол (пункт відправлення) МЛДВ;  $n_t$  – кінцевий вузол (пункт призначення) МЛДВ;  $n_{i_1}, n_{i_2}, \dots, n_{i_m}$  – проміжні вузли (транзитні пункти) МЛДВ. Множина дуг, що входить до структури ланцюга, позначається як  $A(L) \subseteq A$ , а множина внутрішніх вузлів –  $N^{\text{вн}}(L)$ .

Для кожного альтернативного варіанта МЛДВ  $L$  вартісні, часові та екологічні показники визначаються шляхом агрегування параметрів дуг та вузлів:

$$\kappa(L) = \sum_{(i,j) \in A(L)} \kappa_{ij} + \sum_{i \in N^{\text{вн}}(L)} \kappa_i \quad (3)$$

$$\tau(L) = \sum_{(i,j) \in A(L)} \tau_{ij} + \sum_{i \in N^{\text{вн}}(L)} \tau_i \quad (4)$$

$$\varepsilon(L) = \sum_{(i,j) \in A(L)} \varepsilon_{ij} + \sum_{i \in N^{\text{вн}}(L)} \varepsilon_i \quad (5)$$

де  $\kappa_{ij}, \tau_{ij}, \varepsilon_{ij}$  – вартісні, часові та екологічні характеристики транспортно-логістичних операцій на дузі  $(i, j)$ ;  $\kappa_i, \tau_i, \varepsilon_i$  – вартісні, часові та екологічні характеристики  $i$ -го вузла, пов'язані з виконанням процесів обробки, зберігання, експедиційного та додаткового логістичного обслуговуванням.

Вартісні показники мультимодального ланцюга, як правило, мають детермінований характер та визначаються в залежності від встановлених тарифів на транспортні й логістичні послуги, та витрат на термінальну обробку вантажів у вузлових елементах ІТЛС, зокрема в аеропортових комплексах. Екологічні показники відображають рівень негативного впливу на довкілля, що виникає як у процесі переміщення вантажів, так і під час їх обробки та зберігання у транспортних вузлах.

Іншу природу мають часові параметри, значення яких формуються під впливом великої кількості чинників, серед яких нестабільність попиту на транспортно-логістичне обслуговування, нерівномірність надходження вантажопотоків, завантаженість інфраструктурних об'єктів, технологічні особливості обробки вантажів у вузлових елементах, а також зовнішніх умов функціонування ІТЛС. З урахуванням цього, тривалість окремих транспортних та вузлових операцій доцільно розглядати в якості випадкових величин, оскільки на практиці дуже часто відсутній достатній обсяг статистичних даних, необхідних для обґрунтованого вибору закону розподілу та оцінювання його параметрів. Тому, часові характеристики окремих ланок мультимодального ланцюга можуть бути задані мінімальним  $t_{\text{мін}}$ , максимальним  $t_{\text{макс}}$  та найбільш ймовірним  $t_{\text{наймов}}$  значеннями, що дозволяє врахувати їх варіативність та створює основу для подальшого моделювання відповідних процесів.

Параметризація випадкової тривалості транспортно-логістичного циклу здійснюється за допомогою бета-розподілу, область визначення якого є обмеженою. Звідси виходить, що кожен мультимодальний ланцюг доставки вантажів (МЛДВ) може бути описаний вектором параметрів:

$$Z(L) = (\kappa(L), \tau(L), \varepsilon(L)), \quad (6)$$

компоненти якого відповідають вартісному, часовому та екологічному критеріям та створюють підґрунтя для подальшого проведення багатокритеріального аналізу.

При цьому, оцінку ефективності  $\nu$ -го варіанту мультимодального ланцюга доставки пропонується виконувати за допомогою інтегральної цільової функції, яка спрямована на мінімізацію його вартісних, часових та екологічних характеристик:

$$F^{\nu} = \omega_{\kappa} \kappa_{\text{норм}}^{\nu} + \omega_{\tau} \tau_{\text{норм}}^{\nu} + \omega_{\mu} \varepsilon_{\text{норм}}^{\nu} \rightarrow \min, \quad (7)$$

де  $\omega_{\kappa}$ ,  $\omega_{\tau}$ ,  $\omega_{\mu}$  – вагові коефіцієнти, що відображають пріоритетність вартісного, часового та екологічного критеріїв (визначаються експертним шляхом відповідно до обраного сценарію управління ланцюгом доставки).

Відзначимо, що на етапі прийняття рішення можуть виникати суперечності між встановленими вимогами та управлінськими пріоритетами щодо ефективності певного ланцюга доставки, тому доцільним є застосування сценарного підходу, що дозволяє дослідити вплив різних стратегічних напрямків управління на результати оптимізації.

У даній роботі вибір оптимальної структури ланцюга доставки вантажів пропонується здійснювати за трьома сценаріями (С1-С3): мінімізація загальних витрат на доставку вантажів «від дверей до дверей» (С1); скорочення загальної тривалості транспортно-логістичного циклу (С2); мінімізація екологічного впливу ланцюга доставки вантажів на довкілля (С3).

Специфіка мультимодальних ланцюгів доставки в ІТЛС полягає в тому, що їх вартісні, часові та екологічні показники визначаються не лише параметрами транспортних зв'язків, а й умовами функціонування вузлових елементів системи.

Для аеропортових комплексів як ключових вузлових елементів мультимодальних ланцюгів доставки вантажів властива підвищена мінливість часових параметрів технологічних процесів, що пов'язано з нерівномірністю надходження вантажопотоків, обмеженістю пропускної спроможності інфраструктури та її здатністю забезпечувати інтеграцію різних видів транспорту, а також необхідності виконання широкого спектру транспортно-логістичних процедур з перевалки, обробки, зберігання, консолідації, координації та синхронізації вантажопотоків. Крім того, часові характеристики аеропортових вузлів залежать від наявності слотів на обслуговування повітряних суден, доступності рівня завантаженості перонних засобів механізації, що використовуються під час виконання навантажувально-розвантажувальних робіт та ін.

Сукупність зазначених чинників може спричинити технологічні затримки стохастичної природи, що негативно впливає не лише на часові, вартісні показники, а й на екологічні наслідки роботи аеропортових комплексів, мультимодальних ланцюгів доставки та ІТЛС в цілому.

За такої невизначеності дослідження параметрів роботи системи потребує застосування імітаційного моделювання, яке надає можливість формувати вибірку варіантів випадкової величини та визначати ймовірність виконання перевізного процесу в межах заданого інтервалу. Завдяки цьому ключові критерії результативності мультимодальних ланцюгів доставки з авіаційною складовою оцінюються не тільки за середніми значеннями, а й з урахуванням мінливості показників

та рівня їх надійності, що має ключове значення для забезпечення ефективної діяльності ІТЛС.

З метою апробації запропонованих методичних положень розроблено імітаційну модель мультимодального ланцюга доставки вантажів між Шанхаєм (Китай) та Києвом (Україна) із використанням програмного середовища AnyLogistix. Вибір такого маршруту обумовлений необхідністю пошуку альтернативних схем доставки вантажів за обмеженої доступності авіаційної інфраструктури на українській та російській територіях, що пов'язано із закриттям авіаційного простору в Україні для цивільної авіації через активні військові дії. При таких умовах використання аеропортів України для приймання комерційних вантажних рейсів є неможливим, однак доставка вантажів автомобільним транспортом через сухопутні прикордонні переходи з країнами ЄС залишається доступною. У зв'язку з цим, на етапі проектування логістичного ланцюга передбачено транспортування вантажів від транзитних європейських аеропортів до Києва наземними видами транспорту.

Враховуючи цільову спрямованість дослідження на формування ланцюгів доставки з авіаційною складовою для вантажів, чутливих до тривалості перевезення, зокрема гуманітарних, медичних, швидкопсувних вантажів і товарів із коротким життєвим циклом, морський транспорт не включено до альтернативних схем доставки. Для таких вантажопотоків морський сегмент, попри потенційно нижчу вартість, істотно збільшує тривалість транспортно-логістичного циклу, що має критичне значення. Разом із тим, запропонована методика може бути розширена шляхом введення до мережевої структури ІТЛС морських маршрутів в якості додаткових дуг графу, а морських портів як вузлових елементів системи.

Під час формування вихідних даних для імітаційного моделювання враховано відкриту інформацію глобальних логістичних операторів DHL Global Forwarding, Kuehne+Nagel та DSV щодо організації міжнародних мультимодальних перевезень із залученням авіаційного транспорту та принципів формування індивідуальних тарифних пропозицій [11-13]. При цьому, вартісні показники не є фактичним комерційним тарифом окремого провайдера, оскільки вони залежать від маршруту, виду вантажу, обсягу партії, паливних надбавок, умов договору та поточної ринкової кон'юнктури. Тому, їх значення приймаються як усереднені розрахункові ставки, визначені за результатами аналізу публічно доступних матеріалів зазначених компаній та використані для порівняльного оцінювання різних транспортних сценаріїв за єдиною розрахунковою базою. Екологічна складова імітаційної моделі сформована на основі методичного підходу EcoTransIT World до розрахунку викидів у вантажних транспортних ланцюгах [14] та відповідно до логіки визначення CO<sub>2</sub> у програмному середовищі AnyLogistix, де викиди задаються для транспортних зв'язків та процесів обробки вантажів [15, 16].

У межах обчислювального експерименту сформовано альтернативні варіанти перевезення, що відрізняються різним комбінуванням видів транспорту на окремих ділянках маршруту (табл. 1).

Для забезпечення коректності порівняння альтернативних варіантів перевезення експериментальні розрахунки виконуються для консолідованої партії вантажу вагою 20 т, яка розглядається як єдиний вантажний потік у межах логістичного ланцюга «від дверей до дверей».

Таблиця 1

**Альтернативні варіанти доставки вантажів між Шанхаєм та Києвом**

Варіант доставки (комбінації видів транспорту) $S_{L1-L11}$		Маршрут перевезення «від дверей до дверей», $L$
$S_{L1}$	Унімодальний: автомобільний	Шанхай – Алмати – Франкфурт-на-Майні – Краків – Київ (авто)
$S_{L2}$	Унімодальний: залізничний	Шанхай – Алмати – Франкфурт-на-Майні – Краків – Київ (залізниця)
$S_{L3}$	Мультимодальний: залізничний + автомобільний	Шанхай – Алмати (залізниця) – Франкфурт-на-Майні – Краків (залізниця), Краків – Київ (авто)
$S_{L4}$	Мультимодальний: автомобільний + авіаційний + залізничний + автомобільний	Шанхай – Алмати (авто), Алмати – Франкфурт-на-Майні (авіа), Франкфурт-на-Майні – Краків (залізниця), Краків – Київ (авто)
$S_{L5}$	Мультимодальний: авіаційний + залізничний + автомобільний	Шанхай – Франкфурт-на-Майні (авіа), Франкфурт-на-Майні – Краків (залізниця), Краків – Київ (авто)
$S_{L6}$	Мультимодальний: авіаційний + залізничний + автомобільний	Шанхай – Франкфурт-на-Майні (авіа), Франкфурт-на-Майні – Краків (залізниця), Краків – Київ (авто)
$S_{L7}$	Мультимодальний: авіаційний + залізничний + автомобільний	Шанхай – Стамбул (авіа), Стамбул – Франкфурт-на-Майні (авіа), Франкфурт-на-Майні – Краків (залізниця), Краків – Київ (авто)
$S_{L8}$	Мультимодальний: авіаційний + залізничний	Шанхай – Стамбул (авіа), Стамбул – Варшава (авіа), Варшава – Київ (залізниця)
$S_{L9}$	Мультимодальний: авіаційний + автомобільний	Шанхай – Стамбул (авіа), Стамбул – Варшава (авіа), Варшава – Київ (авто)
$S_{L10}$	Мультимодальний: авіаційний + автомобільний	Шанхай – Варшава (авіа), Варшава – Київ (авто)
$S_{L11}$	Мультимодальний: авіаційний + залізничний	Шанхай – Варшава (авіа), Варшава – Київ (залізничний)

Запропонована імітаційна модель не передбачає проведення деталізації за конкретними типами транспортних засобів, а враховує усереднені питомі параметри транспортно-логістичного процесу доставки вантажу, що відображають вартість, тривалість та екологічні наслідки роботи відповідного виду транспорту. Приклад реалізації імітаційної моделі маршрутної мережі доставки вантажів між Шанхаєм (Китай) та Києвом (Україна) через авіаційні хаби ЄС (Франкфурт-на-Майні, Варшава) у програмному середовищі AnyLogistix наведено на рис. 2.

Числові результати імітаційного моделювання, отримані в програмному середовищі AnyLogistix зібрані у табл. 2.

Аналіз результатів моделювання свідчить, що параметри ланцюгів доставки вантажів між Шанхаєм (Китай) та Києвом (Україна) суттєво залежать від структури маршруту та способу поєднання наземних та авіаційного видів транспорту. Розрахунки показали, що мультимодальні рішення із залученням авіаційного транспорту за схемою  $S_{L4}$  дозволяють зменшити загальну тривалість доставки до 9,6 діб, а за варіантом  $S_{L10}$  до 3,15 діб, що у 4-5,5 разів швидше порівняно з наземними варіантами перевезення. Проте, альтернативи з авіаційною складовою  $S_{L4} - S_{L11}$  супроводжуються суттєвим зростанням загальних витрат та обсягів викидів  $CO_2$ .

На наступному етапі дослідження виконується обчислення інтегрального критерію ефективності альтернативних варіантів ланцюгів доставки вантажів (формула 7) та проводиться його сценарний аналіз.

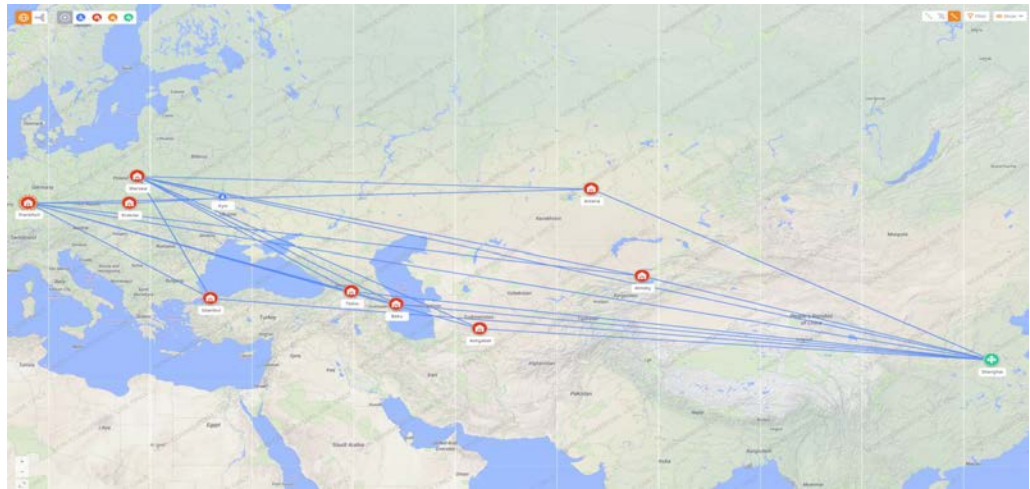


Рис. 2. Маршрутна мережа доставки вантажів між Шанхаєм (Китай) та Києвом (Україна) через авіаційні хаби ЄС (побудовано автором у програмному середовищі AnyLogistix)

Таблиця 2  
Порівняльна оцінка параметрів ланцюгів доставки вантажів між Шанхаєм та Києвом за альтернативними сценаріями

Маршрут	Загальний час, діб $\tau_{ij}$	Загальні витрати, євро $\kappa_{ij}$	Загальний обсяг викидів $\text{CO}_2$ , кг $\varepsilon_{ij}$
$S_{L1}$	12,46	64920	31 152
$S_{L2}$	17,98	41556	7 788
$S_{L3}$	13,79	52820	9 390
$S_{L4}$	9,6	203353	89 483
$S_{L5}$	6,96	292508	127 506
$S_{L6}$	5,5	249955	108 863
$S_{L7}$	6,6	278272	121 272
$S_{L8}$	5,14	259724	113 119
$S_{L9}$	4,35	261117	114 512
$S_{L10}$	3,15	222845	97 751
$S_{L11}$	4,14	221452	96356

Для апробації запропонованих методичних положень за сценаріями С1-С3 приймаються відповідні вектори пріоритетів:  $\omega^{\square 1} = (0,68; 0,22; 0,10)$ ;  $\omega^{\square 2} = (0,22; 0,68; 0,10)$ ;  $\omega^{\square 3} = (0,10; 0,22; 0,68)$ .

Результати сценарної оцінки критеріїв інтегральної ефективності альтернативних ланцюгів доставки вантажів наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Сценарна оцінка параметрів ланцюгів доставки вантажів між Шанхаєм та Києвом за альтернативними ланцюгами доставки

Альтернативний маршрут	Нормалізовані значення складових інтегральної ефективності ланцюга доставки			Інтегральна ефективність ланцюга доставки $F^v$		
	Загальні витрати, $\kappa_{норм}^{v,t}$	Загальний час, $\tau_{норм}^{v,t}$	Загальний обсяг викидів CO <sub>2</sub> , $\varepsilon_{норм}^{v,t}$	$F_{C1}^v$	$F_{C2}^v$	$F_{C3}^v$
$S_{L1}$	0,222	0,693	0,244	0,328	0,545	0,341
$S_{L2}$	0,142	1	0,061	0,323	0,717	0,276
$S_{L3}$	0,181	0,767	0,074	<b>0,299</b>	0,569	<b>0,237</b>
$S_{L4}$	0,695	0,534	0,702	0,66	0,586	0,664
$S_{L5}$	1	0,387	1	0,865	0,583	0,865
$S_{L6}$	0,855	0,306	0,854	0,734	0,481	0,733
$S_{L7}$	0,951	0,367	0,951	0,823	0,554	0,823
$S_{L8}$	0,888	0,286	0,887	0,755	0,479	0,755
$S_{L9}$	0,893	0,242	0,898	0,75	0,451	0,753
$S_{L10}$	0,762	0,175	0,767	0,633	<b>0,363</b>	0,636
$S_{L11}$	0,757	0,23	0,756	0,641	0,399	0,64

Дані табл. 3 свідчать, що при реалізації сценаріїв мінімізації загальних витрат на доставку вантажів «від дверей до дверей» (C1) та мінімізації екологічного впливу ланцюга доставки вантажів на довкілля (C3) оптимальним варіантом переміщення вантажу з Китаю до України вважається мультимодальний маршрут  $S_{L3}$  ( $F_{C1}^v = 0,299; F_{C3}^v = 0,237$ ), що передбачає інтеграцію залізничного та автомобільного видів транспорту на ділянці між Краковом та Києвом. Найменше значення критерію інтегральної ефективності в межах сценарію скорочення загальної тривалості транспортно-логістичного циклу доставки вантажів «від дверей до дверей» (C2) зафіксовано за альтернативним мультимодальним авіаційно-автомобільним маршрутом  $S_{L10}$  ( $F_{C2}^v = 0,363$ ), що підтверджує доцільність залучення авіаційного транспорту до змішаних схем транспортування, коли загальний час доставки має пріоритетне значення.

Отже, на основі результатів імітаційного моделювання визначено, що включення авіаційного транспорту до структури мультимодального ланцюга доставки істотно змінює співвідношення між його економічними, часовими та екологічними показниками. Зокрема, скорочення тривалості перевезення призводить до зростання витрат та екологічного навантаження, що обумовлює необхідність врахування не лише прямих витрат на переміщення вантажів, а й непрямих економічних ефектів, пов'язаних із тривалістю повного транспортно-логістичного циклу, оборотністю ресурсів та часовою чутливістю вантажопотоків. Особливого значення це набуває під час перевезення гуманітарних вантажів, медичних препаратів, швидкопсувної продукції та інших товарів із коротким життєвим циклом, для яких дотримання мінімальних термінів доставки являється визначальною умовою збереження їх властивостей та функціонального призначення.

Крім того, при недоступності елементів української авіатранспортної інфраструктури для виконання прямих авіаційних перевезень і, відповідно, відсутності можливості термінової доставки вантажів, використання транзитних авіаційних вузлів сприяє підвищенню гнучкості та стійкості ІТЛС, частково компенсує інфраструктурні обмеження та сприяє безперервності транспортних процесів. Саме це підтверджує доцільність дослідження альтернативних мультимодальних схем з авіаційною складовою як ефективного інструменту підтримання стабільних зв'язків між глобальними та регіональними транспортно-логістичними мережами.

**Висновки.** Запропоновані у статті методичні положення дозволяють формалізувати мультимодальні ланцюги доставки вантажів з авіаційною складовою в межах ІТЛС на основі мережевого підходу із врахуванням вартісних, часових та екологічних характеристик транспортно-логістичного циклу. Для апробації наведених положень у програмному середовищі AnyLogistix розроблено імітаційну мережеву модель мультимодального ланцюга доставки вантажів між Шанхаєм та Києвом через європейські авіаційні хаби Франкфурт-на-Майні (Німеччина) та Варшава (Польща), а також побудовано та проаналізовано альтернативні варіанти перевезення з урахуванням проміжних аеропортових вузлів Стамбул (Туреччина) та Алмати (Республіка Казахстан). За результатами моделювання встановлено, що залучення авіаційного транспорту забезпечує суттєве скорочення тривалості доставки, проте супроводжується суттєвим зростанням витрат та екологічного навантаження, що підтверджує необхідність врахування не лише прямих транспортних витрат на етапі оцінювання ефективності таких ланцюгів, а й непрямих економічних ефектів, пов'язаних з тривалістю повного транспортно-логістичного циклу, оборотністю ресурсів та часовою чутливістю вантажопотоків. Практична цінність запропонованого підходу полягає у можливості його використання для оцінювання альтернативних схем доставки вантажів, зокрема чутливих до тривалості перевезення, в умовах нестабільності середовища та наявності інфраструктурних обмежень. Наступним етапом дослідження має стати розроблення концептуальних положень багатокритеріальної оптимізації структури мультимодального ланцюга доставки в ІТЛС на основі структурно-функціонального підходу.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Chopra S., Meindl P. Supply Chain Management. Strategy, Planning & Operation. In: Boersch C., Elschen R. (eds). *Das Summa Summarum des Management*. Wiesbaden: Gabler, 2007. P. 265–275. doi: 10.1007/978-3-8349-9320-5\_22.
2. Merkert R. Air Cargo and Supply Chain Management. *The Palgrave Handbook of Supply Chain Management*. Cham: Springer, 2023. P. 1–18. doi: 10.1007/978-3-030-89822-9\_90-1.
3. Wąsowska K. Air transport in the supply chain. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series*. 2018. No. 128. P. 409–420. doi: 10.29119/1641-3466.2018.128.31.
4. Janić M. Analyzing and Modeling Performances of Supply Chains Served by Air Cargo Carrier Networks. *Advances in Airline Economics*. 2022. P. 35–82. doi: 10.1108/S2212-160920220000009003.
5. Борець І.В., Соколова О.Є., Соловійова О.О., Висоцька І.І. Організація мультимодальних перевезень вантажів за участю авіаційного транспорту. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. 2020. № 1(46). С. 35–44. doi: 10.33744/2308-6645-2020-1-46-035-044.

6. Sokolova O., Ivannikova V., Cherednichenko K. Fundamentals of a Sustainable Supply Chain Designing with the Involvement of Air Transport. In: *2024 IEEE 7th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD)*, Kyiv, Ukraine, 22–24 October 2024. 2024. P. 140–145. doi: 10.1109/APUAVD64488.2024.10765912.
7. Ivannikova V., Boldyrieva M., Konovalyuk V. Modern Ecological Approach to Air Transportation Management. In: Prentkovskis O., Yatskiv (Jackiva) I., Skačkauskas P., Junevičius R., Maruschak P. (eds). *TRANSBALTICA XII: Transportation Science and Technology*. Cham: Springer, 2022. P. 658–670. doi: 10.1007/978-3-030-94774-3\_64.
8. Kim S., Choi Y., Kim S. Simulation modeling in supply chain management research of ethanol: A review. *Energies*. 2023. Vol. 16(21). Art. 7429. doi: 10.3390/en16217429.
9. Liu Z., Shirakashi R., Kamiebisu R., Nishi T., Matsuda M. Simulation-based optimization using virtual supply chain structured by the configuration platform. *IFAC-PapersOnLine*. 2023. Vol. 56(2). P. 7840–7845. doi: 10.1016/j.ifacol.2023.10.1145.
10. Cherednichenko K., Ivannikova V., Sokolova O. Simulation Modelling for Supply Chain Optimization with a Logistics Hub Based at an Airport Complex. In: *Advances in Civil Aviation Systems Development*. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 1418. Cham: Springer, 2025. P. 33–44. doi: 10.1007/978-3-031-91992-3\_3.
11. DHL Global Forwarding. Monthly Tariff Guide – DHL. URL: [https://mydhl.express.dhl/content/dam/downloads/bg/en/rate-guide/dhl\\_express\\_monthly\\_tariff\\_guide\\_bg\\_en.pdf](https://mydhl.express.dhl/content/dam/downloads/bg/en/rate-guide/dhl_express_monthly_tariff_guide_bg_en.pdf). (дата звернення: 20.04.2026).
12. Kuehne+Nagel. Quote all modes. URL: <https://mykn.kuehne-nagel.com/oq/site/quote-request> (дата звернення: 20.04.2026).
13. DSV. *Tariff Documents: 101\_DSV Rules Tariff DSV Air & Sea\_03-17-2026*. URL: <https://www.dsv.com/en-us/our-solutions/modes-of-transport/sea-freight/tariffs> (дата звернення: 20.04.2026).
14. EcoTransIT World. Methodology. URL: <https://www.ecotransit.org/en/methodology/> (дата звернення: 20.04.2026).
15. AnyLogistix Help. CO2 Emissions. URL: <https://anylogistix.help/statistics/co2-emissions.html> (дата звернення: 20.04.2026).
16. AnyLogistix Help. CO2 from Processing. URL: (дата звернення: 09.05.2026).

## REFERENCES

1. Chopra, S., & Meindl, P. (2007). Supply Chain Management. Strategy, Planning & Operation. In C. Boersch & R. Elschen (Eds.), *Das Summa Summarum des Management* (pp. 265–275). Gabler. [https://doi.org/10.1007/978-3-8349-9320-5\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-8349-9320-5_22)
2. Merkert, R. (2023). Air cargo and supply chain management. In *The Palgrave Handbook of Supply Chain Management* (pp. 1–18). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-89822-9\\_90-1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-89822-9_90-1)
3. Waşowska, K. (2018). Air transport in the supply chain. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series*, (128), 409–420. <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2018.128.31>

4. Janić, M. (2022). Analyzing and modeling performances of supply chains served by air cargo carrier networks. *Advances in Airline Economics*, 35–82. <https://doi.org/10.1108/S2212-160920220000009003>.
5. Borets, I.V., Sokolova, O.Ye., Soloviova, O.O., & Vysotska, I.I. (2020). Organization of multimodal cargo transportation with participation of air transport [Orhanizatsiia multymodalnykh perevezen vantazhiv za uchastiu aviatsiinoho transportu]. *Bulletin of the National Transport University. Series "Technical Sciences"*, 1(46), 35–44. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2020-1-46-035-044> [in Ukrainian].
6. Sokolova, O., Ivannikova, V., & Cherednichenko, K. (2024). Fundamentals of a sustainable supply chain designing with the involvement of air transport. In *2024 IEEE 7th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD)* (pp. 140–145). <https://doi.org/10.1109/APUAVD64488.2024.10765912>
7. Ivannikova, V., Boldyrieva, M., & Konovalyuk, V. (2022). Modern ecological approach to air transportation management. In O. Prentkovskis, I. Yatskiv (Jackiva), P. Skačkauskas, R. Junevičius, & P. Maruschak (Eds.), *TRANSBALTICA XII: Transportation Science and Technology* (pp. 658–670). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-94774-3\\_64](https://doi.org/10.1007/978-3-030-94774-3_64)
8. Kim, S., Choi, Y., & Kim, S. (2023). Simulation modeling in supply chain management research of ethanol: A review. *Energies*, 16(21), 7429. <https://doi.org/10.3390/en16217429>
9. Liu, Z., Shirakashi, R., Kamiebisu, R., Nishi, T., & Matsuda, M. (2023). Simulation-based optimization using virtual supply chain structured by the configuration platform. *IFAC-PapersOnLine*, 56(2), 7840–7845. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1145>.
10. Cherednichenko, K., Ivannikova, V., & Sokolova, O. (2025). Simulation modelling for supply chain optimization with a logistics hub based at an airport complex. In *Advances in Civil Aviation Systems Development (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 1418, pp. 33–44)*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-91992-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-91992-3_3)
11. DHL Global Forwarding. Monthly Tariff Guide – DHL. URL: [https://mydhl.express.dhl/content/dam/downloads/bg/en/rate-guide/dhl\\_express\\_monthly\\_tariff\\_guide\\_bg\\_en.pdf](https://mydhl.express.dhl/content/dam/downloads/bg/en/rate-guide/dhl_express_monthly_tariff_guide_bg_en.pdf). (date of access: 20.04.2026).
12. Kuehne+Nagel. Quote all modes. URL: <https://mykn.kuehne-nagel.com/oq/site/quote-request> (date of access: 20.04.2026).
13. DSV. *Tariff Documents: 101\_DSV Rules Tariff DSV Air & Sea\_03-17-2026*. URL: <https://www.dsv.com/en-us/our-solutions/modes-of-transport/sea-freight/tariffs> (date of access: 20.04.2026).
14. EcoTransIT World. Methodology. URL: <https://www.ecotransit.org/en/methodology/> (date of access: 20.04.2026).
15. AnyLogistix Help. CO2 Emissions. URL: <https://anylogistix.help/statistics/co2-emissions.html> (date of access: 20.04.2026).
16. AnyLogistix Help. CO2 from Processing. URL: (date of access: 09.05.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 22.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 01.07.2026

**ENHANCING VEHICLE EFFICIENCY: HIGH-STRENGTH STEEL  
SELECTION FOR IMPROVING THE LOAD-BEARING CAPACITY  
OF THE CARRYING MODULE**

**O.V. Fomin<sup>1</sup>, O.V. Burlutskyi<sup>2</sup>, V.S. Lisnychiy<sup>1</sup>, I.V. Gunko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Railway Cars and Structures, Kyiv Institute of Railway Transport,

*National Transport University, Kyiv, Ukraine*

*ORCID ID: 0000-0003-2387-9946*

<sup>2</sup> PhD (Engineering), Associate Professor at the Department of Computer Modelling and Integrated Pressure Treatment Technologies,

*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine*

*ORCID ID: 0000-0003-1902-5809*

<sup>1</sup> Postgraduate Student at the Department of Railway Cars and Structures, Kyiv Institute of Railway Transport,

*National Transport University, Kyiv, Ukraine*

*ORCID ID: 0009-0005-1543-923X*

<sup>1</sup> Postgraduate Student at the Department of Railway Cars and Structures, Kyiv Institute of Railway Transport,

*National Transport University, Kyiv, Ukraine*

*ORCID ID: 0009-0003-6641-859X*

**Summary**

**Introduction.** *The tare weight coefficient of 1520 mm gauge freight wagons is significantly higher compared to North American freight wagons, which limits their load capacity and transportation efficiency. The main reasons for this are conservative standards for calculating welded joints and the use of low-alloy steels of the 09G2S type with insufficient strength characteristics. **Relevance.** The tare weight coefficient of 1520 mm gauge freight wagons (0.29–0.34) is almost twice as high as that of North American wagons (0.17–0.24). The global wagon building industry has been using high-strength steels with a yield strength of up to 700–960 MPa for more than 20 years, which makes it possible to create wagons with a load capacity of up to 116 tons with a tare weight of 18–25 tons. In Ukraine, this experience is almost not implemented due to the lack of scientifically based recommendations. **Purpose of the study.** The purpose of this scientific study is to identify the reasons for the significantly higher tare weight coefficient of 1520 mm gauge wagons compared to North American freight wagons and to substantiate the possibility of increasing the load capacity of gondola cars by applying optimized high-strength steel for load-bearing elements. **Results.** It has been established that when using high-strength steels, the weight of a beam can be reduced five times compared to 09G2S steel. However, the presence of a welded joint, due to low allowable stresses (recommendations of the International Institute of Welding), increases the weight of the structure almost 2 times regardless of the steel grade. Based on the optimization of the chemical composition of 09G2S steel, a material with an ultimate strength of up to 750 MPa, a yield strength of up to 570 MPa while*

*maintaining an elongation of 21% was obtained. The application of such steel in the structure gondola car it possible to reduce the tare weight by 2 tons and increase the load capacity to 73 tons. Finite element calculations confirmed the compliance of the structure with the requirements of strength (safety factor 1.01–1.14), rigidity (maximum deflection of the center sill 4 mm) and stability (safety factor  $n_y = 6.3 > [n_y] = 1.1–1.6$ ). **Conclusions.** A comprehensive approach to increasing load capacity is proposed, based on recognizing the fatigue strength of a welded joint as the main criterion for tare weight, using an optimized chemical composition of 09G2S steel obtained using integral physicochemical criteria, and practical implementation in a serial gondola car. Directions for reducing tare weight have been developed: experimental refinement of the strength of welded joints, increasing their endurance, switching to bolted joints.*

**Key words:** gondola car, high-strength steel, chemical composition optimization, welded structures, load capacity, fatigue strength.

### ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ: ВИБІР ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПОЛІПШЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ НЕСІВНОГО МОДУЛЯ

**О.В. Фомін<sup>1</sup>, О.В. Бурлуцький<sup>2</sup>, В.С. Лісничий<sup>1</sup>, Є.В. Гунько<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> д.т.н., професор, професор кафедри «Вагони та вагонні споруди»,  
Освітньо-науковий Київський інститут залізничного транспорту,  
Національний транспортний університет, Київ, Україна  
ORCID ID: 0000-0003-2387-9946

<sup>2</sup> к.т.н., доцент кафедри комп'ютерного моделювання та інтегрованих  
технологій обробки тиском,  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Харків, Україна  
ORCID ID: 0000-0003-1902-5809

<sup>1</sup> аспірант кафедри «Вагони та вагонні споруди»,  
Освітньо-науковий Київський інститут залізничного транспорту,  
Національний транспортний університет, Київ, Україна  
ORCID ID: 0009-0005-1543-923X

<sup>1</sup> аспірант кафедри «Вагони та вагонні споруди»,  
Освітньо-науковий Київський інститут залізничного транспорту,  
Національний транспортний університет, Київ, Україна  
ORCID ID: 0009-0003-6641-859X

#### **Анотація**

**Вступ.** Коефіцієнт тари вантажних вагонів колії 1520 мм є суттєво вищим порівняно з вагонами Північної Америки, що обмежує їхню вантажопідйомність та ефективність перевезень. Основними причинами цього є консервативні норми розрахунку зварних з'єднань та використання низьколегованих сталей типу 09Г2С з недостатніми міцнісними характеристиками. **Актуальність.** Коефіцієнт тари вантажних вагонів колії 1520 мм (0,29–0,34) майже вдвічі вищий, ніж у вагонів Північної Америки (0,17–0,24). Світове вагонобудування вже понад 20 років використовує високоміцні сталі з межею текучості до 700–960 МПа, що дає змогу створювати вагони вантажопідйомністю до 116 т з масою тари 18–25 т. В Україні цей досвід майже не впроваджується через відсутність

науково обґрунтованих рекомендацій. **Мета дослідження.** Метою цього наукового дослідження є виявлення причин суттєво більшого коефіцієнта тари вагонів колії 1520 мм порівняно з вантажними вагонами Північної Америки й обґрунтування можливості підвищення вантажопідйомності піввагонів шляхом застосування оптимізованої високоміцної сталі для несучих елементів. **Результати.** Встановлено, що за використання високоміцних сталей масу балки можна знизити вдвічі порівняно зі сталлю 09Г2С. Проте наявність зварного з'єднання через низькі допустимі напруження (рекомендації Міжнародного інституту зварювання) збільшує масу конструкції майже вдвічі незалежно від марки сталі. На основі оптимізації хімічного складу сталі 09Г2С отримано матеріал з межею міцності до 750 МПа, межею текучості до 570 МПа за збереження відносного видовження 21 %. Застосування такої сталі в конструкції напіввагона дає змогу знизити масу тари на 2 т та підвищити вантажопідйомність до 73 т. Розрахунки за методом скінчених елементів підтвердили відповідність конструкції вимогам міцності (коефіцієнт запасу  $1,01-1,14$ ), жорсткості (максимальний прогин хребтової балки 4 мм) та стійкості (коефіцієнт запасу  $\nu = 6,3 > [\nu] = 1,1-1,6$ ). **Висновки.** Запропоновано комплексний підхід до підвищення вантажопідйомності, що базується на визнанні втомної міцності зварного з'єднання головним критерієм маси тари, використанні оптимізованого хімічного складу сталі 09Г2С, отриманого за допомогою інтегральних фізико-хімічних критеріїв, та практичній реалізації в серійному піввагоні. Розроблено напрями зниження тари: експериментальне уточнення міцності зварних з'єднань, підвищення їх витривалості, перехід на болтові з'єднання.

**Ключові слова:** піввагон, високоміцна сталь, оптимізація хімічного складу, зварні конструкції, вантажопідйомність, втомна міцність.

**Introduction.** The current development of the transport industry requires the promotion of innovative solutions to improve the competitiveness of transportation. One of the key directions of modernization of a dry warehouse is a reduction in the moisture content of transport means while simultaneously increasing its demand. The efficiency of the functioning of transport systems absolutely depends on the technical and economic indicators of non-constructive structures. The use of traditional construction materials often limits the possibilities of further upgrading transport modules. The curing of high-grade steels opens up new prospects for optimizing metallicity without losing value.

The market for commercial transport in 2025 demonstrates a clear regional structure. The largest share of the market is accounted for by the Asia-Pacific region with approximately \$201 billion. USA. The goal of leadership is determined, first of all, by the laborious economy of China and India, which actively invest in the development of their transport lines for the transportation of raw materials and finished products. Another place is taken by Northern America with a debt of about 100.7 billion dollars, where the US and Canada play a key role with their existing border for the transport of agricultural goods, energy and industrial advantages. Europe, with a market of approximately \$70.5 billion, rounds out the top three. Here, important transported goods are closely integrated into the EU economy, and will have a significant impact on them through

the development of industrial production. The region of the world, including Brazil, Russia, the Republic of Turkey and Turkey, receives 54.7 billion dollars of the market [1].

**Relevance of the research.** The tare coefficient for trailer cars with a gauge of 1520 mm (0.29–0.34) is twice as high as that for cars of Eastern America (0.17–0.24). This means that when one ton of vantage is transported, the Ukrainian slicks are transported at the same time as much as twice as much metal and water construction, which reduces the efficiency of transportation and increases the cost of cravings. The main reasons for this are:

- conservative standards for the design of welded joints, so as not to ensure the actual safety of high-grade steels;
- mass production of low-alloy steels type 09G2S with insufficient low-grade characteristics (liquidity limit less than 345 MPa).

Light railcar manufacturing (USA, Canada, EU) has already been using high-grade high-grade steel for over 20 years with a fluidity limit of up to 700–960 MPa, which allows the construction of railcars with a lifting capacity of up to 116 tons with a tare weight 18–25 tons. In Ukraine, this may not be implemented due to the number of scientifically based recommendations on the selection of materials and welding technologies [1].

Thus, the relevance of the work lies in the need to meet the gap between the potential of high-grade steels and formal conservative standards, as well as the created scientifically-based methods for selecting materials for load-bearing modules of transport vehicles. *zaobiv.*

**Analysis of information sources on further research topics.** The publication [2] examines constructive approaches to designing the body of a vantage car with an extended vantage point. The author analyzes the infusion of geometric parameters and the choice of materials for the structural integrity of the structure. Significant attention is paid to the optimization of mass with an immediate increase in weight. Viktoritano numerical modeling for the assessment of stress-strain steel. The results demonstrate the promise of improved designs for important transport.

In work [3], the influx of thermal forward pressure on the mechanical work of beam elements was observed. An analysis of changes in stress and deformation at the stage of manufacturing the structure was carried out. It has been established that the front thermal expansion can therefore be affected by excess stress. The authors highlight the possibility of cervicalization with these processes to improve durability. The results may have practical significance for the manufacturing technologies of carriage structures.

The publication [4] examines the optimization of the shot blasting process before upgrading the original structures of cars. The influence of processing parameters on surface softness and adhesive strength has been analyzed. Optimal modes have been established to ensure effective renewal. Viktoristan experimental and analytical methods of investigation. The results obtained indicate an increased service life of the repaired elements.

The article [5] examines the mechanisms of change in rack steel during compression. Microstructural changes and their influence on the value of the material were observed. The role of dislocation processes and phase changes has been revealed. Experimental testing was carried out for confirmation.

The work [6] investigated the advancement of mechanical power and wear resistance of rack systems. The main focus is on controlling the foldable microstructure

of the material. The relationship between microstructure and operational characteristics has been established. Vikoristan modern methods of material science for analysis. The results obtained are consistent with the creation of more reliable rack systems.

Publication [7] split bainite steels for slide rails. Their mechanical and structural characteristics were studied. The advantages of the bainitic structure in terms of wear resistance and value have been established. The authors demonstrate the feasibility of producing such steels in transport galuz. The results have significant potential for improving infrastructure reliability.

The article [8] evaluates the effectiveness of double-ball steel as a structural material for cars. A comprehensive analysis was carried out using traditional materials. An improvement in the functional characteristics and resistance to damage was revealed. The peculiarities of the robotic material under consideration are examined. The obtained results confirm the prospects of stagnation of rich ball steels.

The work [9] provided the results of full-scale investigations of a stress-strained steel reinforced steel structure. Conducted simulation in real minds of operation. The nature of the stress distribution in structural elements has been established. We extracted the data from the selection process for the validation of rozrakhunkov models. The results improve the accuracy of predicting the service life of the structure.

The publication [10] contains a comprehensive analysis of the internal value of the frames of suspended cars. The influx of welding technology and design solutions has been monitored. The key factors that determine the durability of frames have been identified. Experimental testing was carried out to confirm the results. The removal of the pins may be subject to change when designing new cars.

In work [11], the influence of alloying and microstructure on the formability of high-grade steels was observed. The steels were examined, cut using the hardening method with a further distribution of phases. The relationship between structural parameters and plasticity of the material has been established. Vikoristan experimental and numerical approaches. The results are important for the development of new materials for transport machinery.

The article [12] investigated the non-stationary factors of the independent importance of the connection of trailer cars. A mathematical model for assessing the resource of elements has been developed. Changes in maintenance and use are ensured. An analysis of the influence of various factors on durability was carried out. The obtained results allow us to improve the accuracy of the prediction of the service life of the structure.

The article [13] has a developed mathematical model for the operational management of the characteristics of the metal structure in the minds of serial steelmaking. The main idea of the study is that at the time of forecasting we should take into account the concept of a direct chemical bond to the metal, which binds its composition, structure and power to the metal. The concept is presented, supplemented with elements of optimization of the chemical steel warehouse according to the criterion of stabilization of mechanical forces, methods of planning experiments, which resulted in the removal of intervals for the variation of the main criteria for optimization. The Optim 570 steel and mechanical characteristics were optimized.

The article [14] elaborates a method for assessing the influx of volatile elements on the kinetics of phase transformations, which opens the way to the purposeful design

of materials with improved performance characteristics. Predicting microstructural changes makes it possible to minimize defects and deformations that occur during thermal processing, thereby reducing the number of defects in the plant. The research results provide a scientifically grounded basis for the development of standards and regulatory documentation for thermal processing of steels for transport machinery.

Optimization of the chemical storage of steel 09G2S (newly optimized steel Optim 570) leads to a significant reduction in the kinetics of metadynamic recrystallization, which ensures the formation of a granular, uniform structure. This does not reduce mechanical power, but also reduces energy and technological costs, which increases the economic efficiency of production.

An analysis of scientific publications [2–14] confirms that the nutritional efficiency of transport machinery is actively developing through improved design, manufacturing technologies and updating of car elements. Much attention is paid to the development and hardening of new materials: bainite steels [7], double-ball [8] and optimized chemical storages (for example, Optim 570 [13]), which demonstrate improved mechanical properties power, durability and technology.

However, regardless of the obvious results of infusion of lamination [11], thermal transfer [3], microstructural changes [5, 6] and internal connections [10, 12], complex equal investigation high-grade steels of various classes of value in the minds of cyclic wear, typical for the operation of vans, on a daily basis. Most of the work highlights either the outside aspects of the behavior of materials or the hidden principles of design without addressing the specifics of the changing objectives.

This necessitates the need to carry out independent scientific and applied research, aimed at an up-to-date analysis of the characteristics of high-grade steels (in particular, Optim 570 modified from the traditional 09G2S) in the minds of the cyclic In order to allow lining, we recommend optimal materials for the creation of reliable and durable body structures for vantage cars with extended vantage capacity.

**Investigation methods.** To determine the stress-deformation of the non-strain module, the method of sheared elements (MCE) is used as the core of current software complexes. Mathematical modeling of dynamic processes was based on the methods of classical mechanics and the theory of springs. A regular analysis of the power of steels was carried out using various methods of mathematical statistics and theories for making decisions. Verification of the obtained results was carried out by compiling detailed data from the results of field testing of similar structures.

**The object and subject of investigation.** Object of investigation – processes of development and functioning of non-new modules of transport devices.

Subject of investigation – patterns of influx of mechanical characteristics of high-grade steels at non-structural parameters.

**Aims and objectives of the study.** Scientific development and development of methods for selecting rational grades of high-composition steels for structural elements of transport devices.

Investigation tasks

1. Analyze the current production of high-grade steels in light transport machinery and identify potential reserves for their production.

2. Significantly the main types and intensity of pressure that act on the new transport module in real terms of operation.

3. Conduct a thorough analysis of the non-material design of the structure with the frozen traditional and promising materials.

4. Assess the influence of technological processes of production, welding, and the mechanical characteristics of the manufactured steels in the module warehouse.

5. Establish criteria for selecting the optimal steel grade in order to ensure maximum efficiency and minimum mass.

**Contribution to the main material.** Reduced wagon weight for priority wagon building plants. On the tracks of Northern America, the tare coefficient for vantage cars becomes 0.17...0.24 with axle pulls of 32–35 tf. In the space of 1520 mm, this coefficient is still 0.29...0.34, which is perhaps twice as high. In the table 1 shows the characteristics of models with a minimum tare coefficient.

Table 1

Characteristics of vantage railcars

Model of the carriage, region, producer	Load capacity, t	Tare weight, t	Body volume, m <sup>3</sup>	Axial load, t/vs	Tare coefficient
12-4106, Ukraine (TOV TAS DNIPROVAGONMASH)	70	23.9	78	23.5	0.34
12-7023, Ukraine (KVZ)	70.3	23.7	90	23.5	0.33
12-8520, Ukraine (DMZ Carpathia)	71	23	81.4	23.5	0.32
12-9933, Ukraine (Diesel plant)	70	24	78	23.5	0.34
12-9745, Ukraine	70	24	76	23.5	0.34
Greenbrier, USA	98.7	31.1	86.2	32.5	0.31
37MILL GONDOLA, USA, American Railcar Industries	105	24.7	70.8	32	0.24
GONDOLA-MILL, Canada, National Steel Car	116	24.3	76	35	0.21
Hybrid Gon, USA, Freight Car America	108.1	21.79	115	32.5	0.20
Beth GonAeroflo, USA, Freight Car America	110	18.9	110	32	0.17

The analysis showed that the cars of Eastern America, in most cases, have a lower tare ratio equal to the cars produced in Ukraine. Salvage transport should be carried out to metal galleries and the highest survivability of metal products. Robots [13, 14] have demonstrated the cost-effectiveness of using new materials – high-grade steels, corrosion-resistant steels, aluminum alloys, the use of which will ensure a reduction in the weight of the packaging materials. wagons.

Behind the cordon, the depletion of high-grade materials from the production of vantage cars began approximately 20 years ago. At the railcar edges, SND steels with increased pressure (up to 390 MPa) in the elements of the main cars began to be used during the production of the new generation of cars. The main reinforced components [9] are the center beam of the car frame, the sheets of the pivot and intermediate beams of the carriage frames, the vertical pillars of the car body, the shell sheets and bottoms of the tank car boilers, the lining of the car body. Although such a decision would allow a change in the tare weight, the reduction in the tare coefficient for new cars is insignificant.

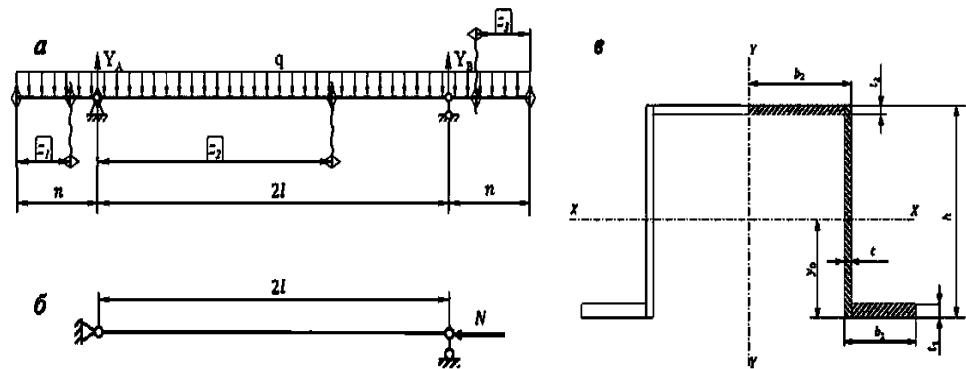
*Placing the possibility of stagnation of high-grade steel during the preparation of load-bearing elements of vantage cars with extended vantage capacity*

It is important to supply technical components to structural materials for load-bearing elements of vantage cars [standards].

The assessment of the suitability of rolled metal from high-grade steels for welded structures of vantage cars must be carried out in accordance with the complex of indicators of the operational authorities of the metal in welded structures. Before such displays:

- inter-linearity, time-of-hour support, daily subordination;
- sensitivity to stress concentration, which indicates the strength of the structure;
- cold resistance, which means support for harsh collapse when low temperatures;
- corrosion resistance in atmospheric conditions and in contact with materials being transported;
- flexibility of widening of external cracks (survivability);
- weldability (including with other steels that are stagnant at the car manufacturing plant) and production in the minds of continuous production at car factories and depots.

Based on the assessment of the possibility of stagnation of high-grade steel during the preparation of load-bearing elements of vantage cars, an investigation was carried out to determine the flow rate of steel on the surface. designs according to the criteria of value and rigidity for a hinged beam with a riser between supports  $2l$ , m, with protruding cantilever sections of length  $n$ , m (Fig. 2, a), evenly anchored division by age  $q$ , kN/m, as well as the criterion of stability of the compressed structure of the beam (rod), stressed by a compressive force  $N$ , kN (Fig. 2, b) [16,17].



*Fig. 1. Spine beam with completed structure  
a – a hinged beam for monitoring the flow of steel between the longitudinal layers onto the structure according to the criteria of value and rigidity; b – shear with hinged ends; c - transverse section of the completed structure*

The tension value  $q$ , kN/m, is chosen in such a way as to ensure maximum stress in the beam, which is representative of the stresses that arise at the spinal beam during the expansion of the car body. The fluidity of the beam material varied in the range from 200 to 600 MPa. Today, low-alloy steel grade 09G2S is most widely used for load-bearing structures of cars according to DSTU [20, 21]. The most frequently used products

are those of class 325 (pivot beam, around car elements with a thickness of 10 mm or more) and 345 (around car elements with a thickness of less than 10 mm). At the same time, in other areas of important mechanical engineering, higher mechanical authorities have become widely involved. So, for example, for the preparation and repair of mining equipment, quarry equipment and suspended equipment, power structures of lifting mechanisms and motor vehicles, high-grade steel is used to stool the edges fluidity of 400 MPa or more [20]. This is due to the occurrence of stagnation in railcar steels with a fluidity limit of 600 MPa or more [15; 16].

On the basis of inspection of the steels that are assembled at the machine, we see grades that indicate the strength of the load-bearing elements of the cars (Table 2), based on the optimization of the chemical warehouse (reduction of carbon, sulfur, phosphorus), steel was extracted with a fluidity limit of 570 MPa – in the table it is designated as Optim 570 which are indicative of the benefits of [13; 8].

Table 2

Grades of high-grade steels for machine-made steels

Country / Region	Steel grade	Yield limit ( $\sigma_s$ , MPa)	Daily life ( $\delta$ ), %	Chemical warehouse (main alloying elements, %)	Floating on strength
Ukraine	09G2S	345	21	$C \leq 0.12$	$Mn \leq 1.40$
USA (ASTM)	A572 Gr.50	345	18	$C \leq 0.26$	$Mn \geq 0.80$
Europe (EN)	S355NL	355	20–22	$C \leq 0.18$	$Mn \leq 0.90–1.65$
Japan (JIS)	SM490A	355	19	$C \leq 0.22$	$Mn \leq 1.60$
Ukraine	Optim 570 [13, 14]	570	21	$C \leq 0.091$	$Mn \leq 1.71$
Germany (DIN)	X20Cr13 (1.4021)	640	10–12	$C \leq 0.16–0.25$	$Cr = 12.0–14.0$
USA (ASTM)	A514	690	18	$C = 0.12–0.21$	$Mn \leq 0.95–1.30$
Europe (EN)	S690QL	690	14–16	$C \leq 0.20$	$Mn \leq 1.70$
Ukraine	30KhGSA	735	10	$C = 0.28–0.34$	$Mn = 0.80–1.10$
Ukraine	40XH2MA	780–980	11–13	$C = 0.37–0.44$	$Mn = 0.50–0.80$
Ukraine	35KhGSA	835	10	$C = 0.32–0.39$	$Mn = 0.80–1.10$
Finland	Optim 960QC	960	7	$C \leq 0.11$	$Si \leq 0.25$
Finland	AR 400 (SSAB)	~965	10–12	$C \leq 0.18$	$Mn \leq 1.70$
Finland	AR 500 (SSAB)	~1100	~8	$C \sim 0.30$	$Si \leq 0.70$

To assess the possibility of reducing metal capacity, the dimensions of an I-beam of minimal weight (Fig. 1) with steels 09G2S, 30KhGSA and Optim 960QC and steel Optim 570 were determined, value, vibrancy and resistance to formal norms.

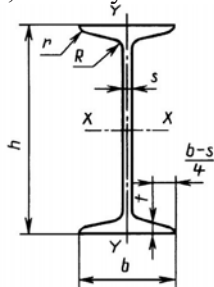


Fig. 2. I-beamridge beam [17]

Expansion of static value I-beams are calculated using the formula:

$$P = \frac{[\sigma] \cdot 4J_x}{2L_1 \cdot h} \quad (1)$$

$P$  – attachment to the beam,  
 $[\sigma]$  – acceptable stress,  
 $J_x$  – moment of inertia across the cut,  
 $L_1$  – stand between the supports,  
 $h$  – beam height.

A beam was assembled, made from steel 09G2S with a moment of inertia of 3016 cm<sup>4</sup>. With a static tension of 447 Pst kN, the stresses in this balance reach the fluidity limit. At the first stage of development, the values of the parameters of beams made from high-tensile steels were determined so that the maximum stresses in them matched the fluidity limits [18, 21].

Table 3

**Characteristics of the beam from the point of view  
of non-excess of fluidity boundaries**

Parameter	09G2S	Optim 570 [13, 14]	30KhGSA	Optim 960QC
$\sigma_T$ , MPa	345	570	835	960
Wall thickness, mm	10	6	4	3.2
Beam weight, kg	40	24	16	13

With static tension, the weight of the beam made of Optim 960QC steel changes three times.

Formulas for determining the boundaries of vivacity (intrinsic value) of a smooth eye

$$\sigma_{-1} \approx 0.50 \cdot \sigma_B$$

$$\sigma_{-1} \approx (0.55 - 0.001 \cdot \sigma_B) \cdot \sigma_B \quad (2)$$

- $\sigma_{-1}$  – the limit of vitriol during the symmetrical cycle of avancement,
- $\sigma_B$  – the boundary of the value of the material.

The value of a smooth beam (Table 4).

Table 4

**Characteristics of the structural beam (without a welded seam)**

Parameter	09G2S	Optim 570 [13, 14]	Optim 960QC	30KhGSA
$\sigma_{a,N}$ (0.5 $\sigma_B$ ), MPa	151	260	503	333
Beam weight, kg	40	20	6	6

High-quality steel allows you to reduce the weight by 6–7 times.

Formula for determining the boundary of the vibration of a beam with the regulation of the stress concentrator [18]

$$\sigma_{a,N} = \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma} \quad (3)$$

$\sigma_{a,N}$  – the boundary of the vibration of the part (beam) at the basis of cycles, N

$\sigma_{-1}$  – the border of the vibrancy of the smooth eye,

$K_{\sigma}$  – a significant coefficient for reducing the limit of vibration (the statistic is used for beams without a welded seam and with a welded seam).

$$K_{\sigma} = 1,5K_{\sigma} = 2,4$$

Formula for dividing the boundary of the welded joint by the method of the International Institute of Welding (IIW) [17]

$$\sigma_{a,N} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^6 \cdot (\text{FAT})^3}{10^7}} \quad (4)$$

$\sigma_{a,N}$  – limit of vibration of the welded joint at the basis of cycles,  $10^7$

FAT – class of internal value of the welded joint (at the MPa statistic),

FAT = 80

$2 \cdot 10^6$  – testing base for FAT,

$10^7$  – rozrakhunka cycle base.

The intrinsic value of a beam with a welded seam (Table 5).

Table 5

**Beam with welded joint**

Parameter	09G2S	Optim 570 [13, 14]	Optim 960QC	30KhGSA
$\sigma_a$ , N [8], MPa	94	110	175	189
Beam weight, kg	40	28	20	18
$\sigma_a$ , N [6] and [16], MPa	23.5	23.5	23.5	23.5
Beam weight, kg	~200	~200	~200	~200

Apparently, before the re-melting, steel was processed with a linearity limit of 570 MPa. Comprehensive research was carried out to confirm the feasibility of stagnation for the production of non-fresh elements for cars with advanced vantage capacity on the same level.

The results of the investigation revealed that rolled products made of high-grade steel with a lamination limit of 570 MPa are based on the chemical storage of the base metal, the mechanical characteristics of the base metal and the vitrification limit

Apparently, according to the standards [6, 16], recommendations of the International Institute of Welding), it is permissible for the stress for a welded joint to be greater than 23.5 MPa, regardless of the value of the base metal. This leads to a paradoxical increase in the weight of the structure by 5 times.

Based on the optimized steel warehouse, a model was divided into a car (Fig. 3). Elements made from new steel (liquidity limit 570 MPa – it is possible to move up to 570 MPa), green color shows optimal steel and orange color shows 09G2S steel:

- cladding of side and end walls;
- top trim;
- horizontal chords and vertical posts of the end walls;
- end beam;
- vertical and bottom sheets of the intermediate beams of the frame.

For the structural assessment of the strength, rigidity and durability of the load-bearing structure of the sub-vehicle with advanced load-bearing capacity, a cross-sectional element model of the sub-car was established, so composed of high-grade steel

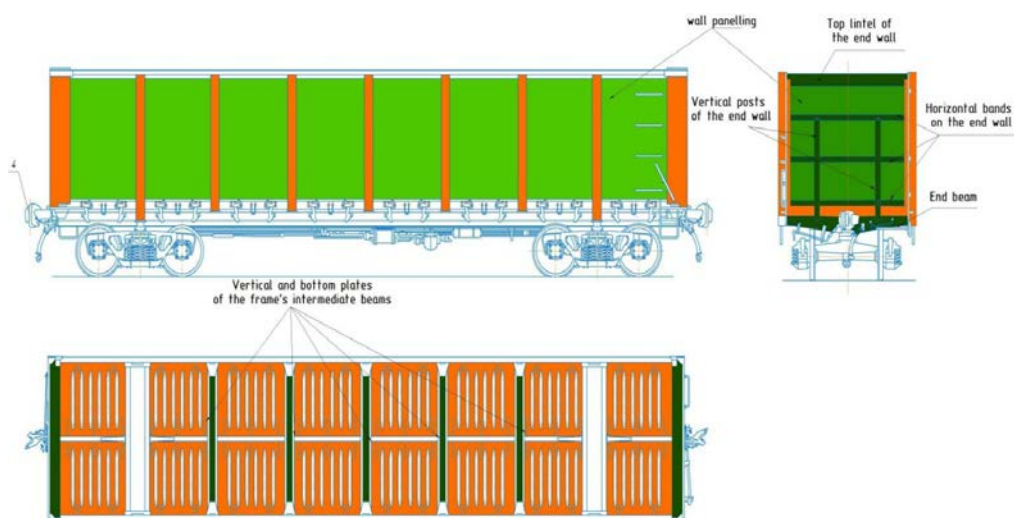


Fig. 3. Elements made of high-grade steel with a fluidity limit of 570 MPa in the structure of a rubber car

elements with a yield limit of 570 MPa (Fig. 4). To confirm the functional characteristics of the fragmented filling car, a set of regulatory developments was carried out based on the terminal element method [15].

To assess the rigidity of the structure, we measured the deformation of the main load-bearing elements when the car was pulled up to full load capacity. The maximum displacements in the main non-bearing elements were summed up:

- maximum deflection of the spinal beam – 4 mm;
- maximum displacement of the points of the upper frame of the beam walls – 9 mm;
- maximum displacement of the points of the beam walls – 9 mm;
- the maximum displacement of the points of the upper frame of the end walls is 1 mm.

Results of end-element analysis (MCE). To confirm the end-element characteristics, a set of regulatory developments was carried out based on the established method of end-element elements. Rigidity of the structure (flex):

- maximum deflection of the spinal beam – 4 mm;
- The maximum movement of the upper frame of the beam walls is 9 mm.

Table 6

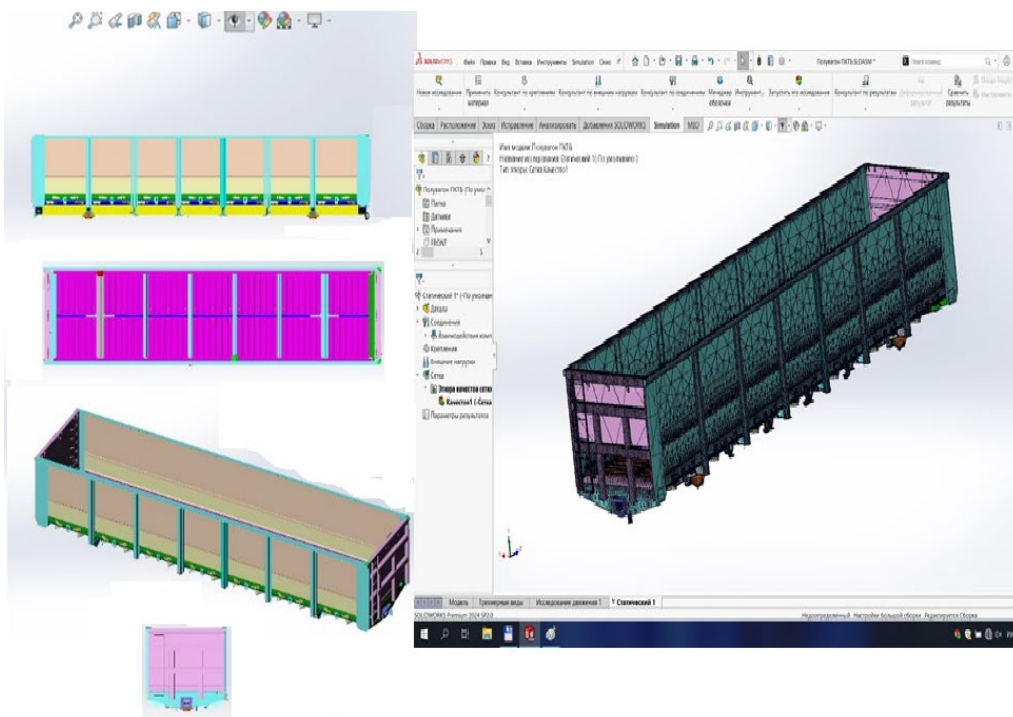
**Impact power of 3.5 MN (I mode):**

Structural element	Stress $\sigma_{ekty}$ , MPa	Stock ratio
Bottom frame of the end wall	369.87	1.02
Upper frame of the end wall	354.83	1.07
Vertical stands	330.92	1.14
Joining the top sheet of the end beam	290.39	1.01

Let's say the stress is MPa. The coefficients will be 1.01–1.14  $[\sigma] = 378,00$

Frame stability: safety factor (allowable for [20]  $n_y = 6,3 [n_y] = 1,1$

Uniqueness to resonance: the first frequency of the body's internal vibrations is



*Fig. 4. A shear-element model of a car with elements made of high-component steel with a yield limit of 570 MPa has been developed*

36.46 Hz, the frequency of the vibrations on the rears is 4.42 Hz → change  $8.25 > 1.5$ .

Development of strength, hardness and resilience

Main results:

Impact power 3.5 MN (I mode):

equivalent stress  $\sigma_{eq} = 369.87$  MPa (lower frame of the end wall) with a tolerance  $[\sigma] = 378$  MPa → safety factor  $1.02 \dots 1.14$ .

Harshness when increased to full intensity:

the maximum deflection of the spinal beam is 4 mm (permissible for mental resonance – much more).

Frame resistance at late-life force 2.5 MN:

durability factor  $n_y = 6.3$  (acceptable  $[n_y] = 1.1$  for [20])

Uniqueness to resonance: the first frequency of the power flexions of the body is 36.46 Hz, the frequency of the oscillation of the rears is 4.42 Hz → change  $8.25 > 1.5$ .

All developments have confirmed the validity of the existing standards [20–24].

Economical effect of the high-speed carriages will ensure additional load capacity of up to 200 t per train compared to standard analogues (axle load 23.5 t); This promotes transport capacity on plots with limited throughput capacity.

**Scientific novelty.** The investigation is based on a thorough theoretical approach to the development of new modules of transport devices in order to identify the specifics of the work of high-component steels at peak pressures. First, a number of conditions were established between the indicator of the fluidity of the material and the possibility

of changing the thickness of the walls of non-porous elements without losing the strength of the structure. The methodology of rich criteria for optimization of the selection of materials for transport structures that operate in the cyclic mode of transportation has undergone further development. A new model has been proposed for assessing the durability of welded joints made from high-grade steels of different alloying grades. Rational ranges of steel values have been identified for which the maximum effect of reducing transport costs is achieved. The need for correction of the coefficients of the reserve of tissue in the presence of thin-walled high-committee profiles in transport workers has been brought up. A scientific approach has been formed to integrate digital models of materials into a global system for automated design of dry warehouses. The research results provide further knowledge about the mechanics of the structure of modern composite metal structures for transport purposes.

**Practical value.** The work is focused on the development of specific engineering techniques that will allow the transport volume to be changed by 15–20% while saving design costs. To improve the results, it will be possible for the textile industry to create a dry warehouse, which indicates the shortest light patterns behind the indicator of vanity. Recommendations for the selection of steels will ensure the shortening of terms in the design of new models of transport vehicles. Removing this data allows you to reduce the cost of fire per unit of transport robot and also reduce the number of non-new modules. Advanced technological capabilities prior to welding high-grade steels increase the toughness and durability of the finished product. The results of the investigation may be used during the modernization of the existing fleet of equipment to extend the term of its service. The economical effect is achieved by increasing the cost of transportation by one transport vehicle and reducing costs for repairs. The materials can be integrated into initial courses for the training of design engineers in the transport profile.

**Discussion of results.** Both scientific and applied results confirm the hypothesis about the critical influx of the mechanical characteristics of steel on the core rigidity of the non-structural module. During the discussion, it was established that the transition to high-grade steel would require not only a change in rolling stock, but also a reconsideration of the configuration of the main power units of the structure. The results of the rozrokhunki testify to the ambiguous reaction of various steel grades to thermal injection during welding, which requires careful control of the production modes. A tendency has been revealed to increase the strength of thin-walled elements to the loss of joint resistance at high stresses. It is controversial to provide optimal compatibility between the material's strength and its toughness at extremely low temperatures. Practical testing of the results on models showed a significant improvement in the dynamic characteristics of the lightweight transport module. Analysis of the obtained data indicates the strength of the vigor of steels beyond the fluidity limit of over 500-700 MPa for the greatest stress zones. In general, the results of the discussion convey the prospects for a radical increase in the efficiency of transport.

**Conclusions.** The hardening of high-grade steels is a strategic priority for the development of daily transport machinery. It has been proven that a rational choice of materials allows one to adequately protect the quality of the modules while minimizing their damage. Mathematical modeling confirmed the possibility of reducing metallicity without damaging the minds of value and hardness. It has been established that high-tensile steels

absorb overvoltage stress in the structure more evenly. The developed methodology for selecting steels is based on a comprehensive consideration of mechanical, technological and economic parameters. Improving the results of the investigation allows us to increase the demand for transport services in the average by 12%. It has been discovered that the key factor in reliability is the strength of welded joints, which depends on the correct selection of welding materials. The use of high-grade steel will ensure the long service life of the transport module in folding road storage units. The economical benefit of using expensive steel is offset by a significant return on energy efficiency. The conducted research will fill the existing vacuum in the design methods of a lightweight dry warehouse. Scientifically based recommendations can become the basis for updating Galou-zian design standards. The results of the work create the foundation for the transition to the development of transport services of a new generation. Further research will focus entirely on the development of materials during high-temperature cycles of avancement.

The main criterion that determines the weight of the current welded cars is the value of the welded joint. Official standards (GOST 33211-2014, recommendations of the International Institute of Welding) stipulate low limits of vibration (23.5 MPa) for high-grade steels, which minimizes their advantages.

Based on the optimization of the chemical stock of steel 09G2S (Optim 570), a material with a fluidity limit of 570 MPa (Optim 570) was extracted, which ensures a uniform yield of 21% and can also be used for production load-bearing elements of carriages.

A model has been developed into a car with non-supporting elements made from high-grade Optim 570 steel. This has made it possible to reduce the tare weight by 2 tons and increase the lifting capacity to 73 tons.

Terminal element analysis confirmed:

- value during shock attacks (reserve coefficient 1.01–1.14);
- rigidity (deflection of the spinal beam 4 mm);
- durability (reserve factor 6.3);
- sensitivity to resonance (frequencies 36.46 Hz versus 4.42 Hz).

To further reduce the tariff you need to:

- carry out testing of welded joints from new steel for waste use;
- develop methods for increasing the vibration of welded seams;
- Frequently replace welded joints with bolts.

## BIBLIOGRAPHY

1. The Statistics Portal. Transportation & Logistics. 2026. URL: <https://www.statista.com/markets/> (дата звернення: 20.04.2026).
2. Bulakh M. Freight wagon body design with increased load capacity. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 13189. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97152-7>.
3. Фомін О.В., Бурлуцький О.В., Іщенко В.М., Красулін О.С., Третьяк В.І. Оцінка впливу термічного попереднього навантаження на механічну роботу балкових елементів транспортних конструкцій на стадії технологій виготовлення. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 5. С. 232–244. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-27>.

4. Fomin O.V., Burlutskyi O.V., Khara M.V., Melnyk O.M., Prochorchuk M.V., Muraviov V.M. Optimisation of the technological process of shot blasting before the restoration of non-weight-bearing structures of freight cars. *Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University*. 2025. No. 3(501). P. 106–112. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2025.3\(501\).11](https://doi.org/10.15589/znp2025.3(501).11).
5. Ivanov Y., Porfiriev M., Gromov V., Popova N., Shliarova Y. Strengthening mechanisms of rail steel under compression. *Metals*. 2024. Vol. 14, No. 1. Article 9. DOI: <https://doi.org/10.3390/met14010009>.
6. Centeno D., Tressia G., Carvalho F.M., Cezario F.E.M., Ariza E.A., Masoumi M. Enhancing mechanical properties and wear resistance of heavy-haul rail systems through complex microstructure control. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 27. P. 1146–1159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.10.004>.
7. Babachenko O.I., Kononenko H.A., Merkulov O.E., Podolskyi R.V., Safronova O.A. Development and research of bainitic steels for railway rails. *International Young Scientists Conference on Materials Science and Surface Engineering*. 2023. Vol. 56. P. 814–819. DOI: <https://doi.org/10.15407/msse2023.053>.
8. Fomin O.V., Burlutskyi O.V., Prochorchuk M., Krasulin O., Zelenskyi O. Evaluation of the efficiency of double-layer steel as a structural material for freight cars. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*. 2025. Vol. 3 (152). P. 139–147. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.3.15>.
9. Hernich M.V., Kliuchyuk S.V. The results of field studies of the stress-strain state of steel-reinforced railway structures. *Science and Transport Progress*. 2022. No. 3–4. P. 70–78. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/276534>.
10. Vega B., Pérez J.Á. Comparative analysis of fatigue strength of a freight wagon frame. *Welding in the World*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-023-01577-5>.
11. Xia P., Vercruyssen F., Celada-Casero C., Verleysen P., Petrov R.H., Sabirov I. et al. Effect of alloying and microstructure on formability of advanced high-strength steels processed via quenching and partitioning. *Materials Science and Engineering*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.09818>.
12. Fomin O.V., Burlutskyi O.V., Kubrak A.V., Holub H.M., Fursina A.D. Non-stationary factors of fatigue resistance and their influence on the service life of freight car joints: mathematical modeling and analysis. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36 (75), № 3, ч. 2. С. 14–22. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.2/03>.
13. Fomin O.V., Burlutskyi O.V., Voronko I., Bursuk O., Kozachuk O. Optimization of the chemical composition of steel for engineering structures by the criterion of stabilization of mechanical properties. *Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University*. 2025. Vol. 15, No. 1. P. 10–17. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-25-1-1>.

14. Fomin O.V., Burlutskyi O.V., Ishchenko V.M., Braikovska N.V., Ivanchenko D.V. Modelling and predicting the microstructure of basic and prospective steels for transport structures after thermal exposure. *Transactions*. 2025. Vol. 6 (155). P. 275–286. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.6.34>.
15. Fomin O.V., Burlutskyi O.V., Stoliarenko T.V., Leonov S.M. Prospects for creating digital twins of freight cars. *The Scientific Journal Transport Development*. 2025. No. 2 (25). P. 45–55. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2025.2-25.04>.
16. Бурлуцький О.В. Особливості методу визначення динамічного навантаження кузова напіввагону. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2012. Вип. 4/7. С. 47–50.
17. Фомін О.В. Математичні моделі зміни основних показників базових несучих елементів кузовів напіввагонів. *Залізничний транспорт України*. 2013. Вип. 5/6. С. 95–104.
18. Бурлуцький О.В., Чухліб В.Л., Губський С.О. Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Фазові співвідношення в металевих матеріалах». Харків : НТУ «ХПІ», 2026. 229 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/100068>.
19. Черкашин Д.В., Якубовський М.Д., Губський С.О., Явтушенко А.В., Бабай Ю.В. Аналіз вібраційних сигналів підшипників із застосуванням RMS-методу. *Збірник наукових праць НУК*. 2025. № 4. С. 89–98. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2025.4\(502\).10](https://doi.org/10.15589/znp2025.4(502).10).
20. ДСТУ ГОСТ 33211:2017 Вагони вантажні. Вимоги до міцності та динамічних якостей. [Чинний від 2019-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 45 с.
21. ДСТУ 8541:2015. Прокат сталевий підвищеної міцності. Технічні умови. [Чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 28 с.
22. Hobbacher A. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. P.W. Cham : Springer, 2016.
23. Приходько Є.В. Ефективність комплексного легування сталі та сплавів. Київ : Наукова думка, 1995. 292 с.
24. Barrow K. Fortescue Railway – лидер тяжеловесного движения. *International Railway Journal*. 2016. No. 11. P. 20–24. URL: <http://www.railjournal.com/index.php/australia-nz/pilbaras-heavyweight-champion-flexes-its-muscles.html?channel=000> (дата звернення: 20.04.2026).

## REFERENCES

1. The Statistics Portal (2026). Transportation & Logistics. Retrieved April 20, 2026, from <https://www.statista.com/markets/>.
2. Bulakh, M. (2025). Freight wagon body design with increased load capacity. *Scientific Reports*, 15, 13189. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97152-7>.
3. Fomin, O.V., Burlutskyi, O.V., Ishchenko, V.M., Krasulin, O.S., & Tretiak, V.I. (2025). Otsinka vplyvu termichnoho poperednoho

- navantazhennia na mekhanichnu robotu balkovykh elementiv transportnykh konstruksii na stadii tekhnologii vyhotovlennia [Assessment of the influence of thermal preloading on the mechanical work of beam elements of transport structures at the stage of manufacturing technologies]. *Naukovyi Zhurnal Metinvest Politekhniky. Seriya: Tekhnichni Nauky*, (5), 232–244. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-27>.
4. Fomin, O.V., Burlutskyi, O.V., Khara, M.V., Melnyk, O.M., Prochorchuk, M.V., & Muraviov, V.M. (2025). Optimisation of the technological process of shot blasting before the restoration of non-weight-bearing structures of freight cars. *Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University*, 3(501), 106–112. [https://doi.org/10.15589/znp2025.3\(501\).11](https://doi.org/10.15589/znp2025.3(501).11).
  5. Ivanov, Y., Porfiriev, M., Gromov, V., Popova, N., & Shliarova, Y. (2024). Strengthening mechanisms of rail steel under compression. *Metals*, 14(1), 9. <https://doi.org/10.3390/met14010009>.
  6. Centeno, D., Tressia, G., Carvalho, F.M., Cezario, F.E.M., Ariza, E.A., & Masoumi, M. (2023). Enhancing mechanical properties and wear resistance of heavy-haul rail systems through complex microstructure control. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 1146–1159. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.10.004>.
  7. Babachenko, O.I., Kononenko, H.A., Merkulov, O.E., Podolskyi, R.V., & Safronova, O.A. (2023). Development and research of bainitic steels for railway rails. *International Young Scientists Conference on Materials Science and Surface Engineering*, 56, 814–819. <https://doi.org/10.15407/msse2023.053>.
  8. Fomin, O.V., Burlutskyi, O.V., Prochorchuk, M., Krasulin, O., & Zelenskyi, O. (2025). Evaluation of the efficiency of double-layer steel as a structural material for freight cars. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 3(152), 139–147. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.3.15>.
  9. Hernich, M.V., & Kliuchyk, S.V. (2022). The results of field studies of the stress-strain state of steel-reinforced railway structures. *Science and Transport Progress*, (3–4), 70–78. <https://doi.org/10.15802/stp2022/276534>.
  10. Vega, B., & Pérez, J.Á. (2023). Comparative analysis of fatigue strength of a freight wagon frame. *Welding in the World*. <https://doi.org/10.1007/s40194-023-01577-5>.
  11. Xia, P., Vercruyssen, F., Celada-Casero, C., Verleysen, P., Petrov, R.H., Sabirov, I., et al. (2021). Effect of alloying and microstructure on formability of advanced high-strength steels processed via quenching and partitioning. *Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.09818>.
  12. Fomin, O.V., Burlutskyi, O.V., Kubrak, A.V., Holub, H.M., & Fursina, A.D. (2025). Non-stationary factors of fatigue resistance and their influence on the service life of freight car joints: mathematical modeling and analysis. *Vcheni Zapysky Tavriiskoho Natsionalnoho Universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni Nauky*, 36(75) (3, Part 2), 14–22. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.2/03>.
  13. Fomin, O.V., Burlutskyi, O.V., Voronko, I., Bursuk, O., & Kozachuk, O. (2025). Optimization of the chemical composition of steel for engineering structures by the criterion of stabilization of mechanical properties.

- Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University*, 15 (1), 10–17. <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-25-1-1>.
14. Fomin, O.V., Burlutskyi, O.V., Ishchenko, V.M., Braikovska, N.V., & Ivanchenko, D.V. (2025). Modelling and predicting the microstructure of basic and prospective steels for transport structures after thermal exposure. *Transactions*, 6(155), 275–286. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.6.34>.
  15. Fomin, O.V., Burlutskyi, O.V., Stoliarenko, T.V., & Leonov, S.M. (2025). Prospects for creating digital twins of freight cars. *The Scientific Journal Transport Development*, 2(25), 45–55. <https://doi.org/10.33082/td.2025.2-25.04>.
  16. Burlutskyi, O.V. (2012). Osoblyvosti metodu vyznachennia dynamichnoho navantazhennia kuzova napivvahonu [Features of the method for determining the dynamic load of a semi-wagon body]. *Vostochno-Evropeiskii Zhurnal Peredovykh Tekhnologii*, (4/7), 47–50.
  17. Fomin, O.V. (2013). Matematychni modeli zminy osnovnykh pokaznykiv bazovykh nesuchykh elementiv kuzoviv napivvahoniv [Mathematical models of changes in the main indicators of basic load-bearing elements of semi-wagon bodies]. *Zaliznychnyi Transport Ukrainy*, (5/6), 95–104.
  18. Burlutskyi, O.V., Chukhlib, V.L., & Hubskeyi, S.O. (2026). *Konspekt leksii z navchalnoi dystsypliny "Fazovi spivvidnoshennia v metalevykh materialakh"* [Lecture notes on the academic discipline "Phase relationships in metallic materials"]. Kharkiv: NTU "KhPI". <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/100068>.
  19. Cherkashyn, D.V., Yakubovskiy, M.D., Hubskeyi, S.O., Yavtushenko, A.V., & Babai, Yu.V. (2025). Analiz vibratsiinykh syhnaliv pidshypanykiv iz zastosuvanniam RMS-metodu [Analysis of vibration signals of bearings using the RMS method]. *Zbirnyk Naukovykh Prats NUK*, (4), 89–98. [https://doi.org/10.15589/znp2025.4\(502\).10](https://doi.org/10.15589/znp2025.4(502).10).
  20. DSTU HOST 33211:2017 (2017). *Vahony vantazhni. Vymohy do mitsnosti ta dynamichnykh yakosteï* [Freight wagons. Requirements for strength and dynamic qualities]. (National standard of Ukraine).
  21. DSTU 8541:2015 (2015). *Prokat stalevyi pidvyshchenoi mitsnosti. Tekhnichni umovy* [High-strength rolled steel. Specifications]. (National standard of Ukraine).
  22. Hobbacher, A. (2016). *Recommendations for fatigue design of welded joints and components* (IIW). Cham: Springer.
  23. Prykhodko, Ye.V. (1995). *Efektivnist kompleksnoho lehuвання stali ta splaviv* [Effectiveness of complex alloying of steel and alloys]. Kyiv: Naukova Dumka.
  24. Barrow, K. (2016). Fortescue Railway – lider tiazhelovesnoho dvizheniia [Fortescue Railway – leader of heavy-haul traffic]. *International Railway Journal*, (11), 20–24. Retrieved from <http://www.railjournal.com/index.php/australia-nz/pilbaras-heavyweight-champion-flexes-its-muscles.html?channel=000>.

Дата першого надходження статті до видання: 24.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 01.07.2026

**ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ АВТОМОБІЛІВ  
В УМОВАХ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ШЛЯХОМ АНАЛІЗУ  
ЕЛЕКТРИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ  
ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

**Ю.Ф. Холодний<sup>1</sup>, О.В. Головіна<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та транспортних технологій,  
Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук, Кременчук, Україна  
ORCID ID: 0000-0009-6695-8258

<sup>2</sup> кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та транспортних технологій,  
Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук, Кременчук, Україна  
ORCID ID: 0000-0002-9858-888X

**Анотація**

*Актуальність дослідження* зумовлена зростанням складності сучасних автомобільних систем, насамперед електронного й електричного обладнання, що ускладнює своєчасне виявлення несправностей у процесі технічної експлуатації. За умов інтенсивного використання транспортних засобів підвищуються вимоги до точності, швидкості та інформативності діагностичних процедур, що потребує переходу до комплексного аналізу параметрів різної фізичної природи. **Метою** дослідження є розроблення та наукове обґрунтування комплексних методів діагностики технічного стану автомобілів в умовах експлуатації на основі інтегрованого аналізу електричних і механічних параметрів. **Методи.** У процесі дослідження використано методи системного аналізу, узагальнення, порівняння та структурно-функціонального моделювання, що дало змогу дослідити підходи до діагностики, інформативні параметри та принципи інтеграції різнорідних даних. **Результати.** Досліджено сучасні підходи до діагностики автомобілів та встановлено доцільність їх комплексного застосування. Охарактеризовано інформативні діагностичні параметри електричного обладнання та технічного стану деталей машин і виявлено їх взаємозв'язок. Обґрунтовано принципи побудови комплексних методів діагностики на основі інтеграції різнорідних даних, зокрема синхронізації, нормалізації та кореляційного аналізу. Виявлено основні наукові та практичні проблеми, що пов'язані з неузгодженістю даних, складністю їх інтерпретації, впливом змінних режимів експлуатації та обмеженою адаптивністю моделей. Доведено, що використання інтегрованого підходу дає змогу підвищити точність і достовірність оцінювання технічного стану. **Висновки.** Обґрунтовано, що впровадження комплексних діагностичних методів, орієнтованих на інтегрований аналіз електричних і механічних параметрів, забезпечує підвищення ефективності технічного обслуговування та створює передумови для переходу до прогностичного обслуговування транспортних засобів. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням інтелектуальних адаптивних

моделей інтеграції різнорідних даних, підвищенням стійкості діагностичних методів до зашумлення сигналів та їх впровадженням у системи моніторингу технічного стану в режимі реального часу.

**Ключові слова:** інтегрована діагностика, сенсорні дані, технічний стан, предиктивне обслуговування, кореляційний аналіз.

## RESEARCH ON METHODS OF VEHICLE DIAGNOSTICS UNDER TECHNICAL OPERATION CONDITIONS BASED ON THE ANALYSIS OF ELECTRICAL EQUIPMENT AND TECHNICAL CONDITION OF MACHINE COMPONENTS

Yu. F. Kholodnyi<sup>1</sup>, O. V. Holovina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Motor Transport and Transport Technologies,  
Branch of the Classical Private University in Kremenchuk, Kremenchuk, Ukraine  
ORCID ID: 0000-0009-6695-8258

<sup>2</sup> Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Motor Transport and Transport Technologies,  
Branch of the Classical Private University in Kremenchuk, Kremenchuk, Ukraine  
ORCID ID: 0000-0002-9858-888X

### Summary

**The relevance** of the study is determined by the increasing complexity of modern vehicle systems, particularly electronic and electrical equipment, which complicates the timely detection of faults during technical operation. Under conditions of intensive use of vehicles, the requirements for accuracy, speed, and informativeness of diagnostic procedures are increasing, which necessitates a transition to the integrated analysis of parameters of different physical nature. **The aim** of the study is to develop and scientifically substantiate comprehensive methods for diagnosing the technical condition of vehicles under operating conditions based on the integrated analysis of electrical and mechanical parameters. **Methods.** The study employs system analysis, generalization, comparison, and structural-functional modeling, which made it possible to investigate diagnostic approaches, informative parameters, and principles of heterogeneous data integration. **Results.** Modern approaches to vehicle diagnostics have been investigated and the feasibility of their integrated application has been established. Informative diagnostic parameters of electrical equipment and the technical condition of machine components have been characterized, and their interrelationships have been identified. The principles of constructing comprehensive diagnostic methods based on the integration of heterogeneous data, including synchronization, normalization, and correlation analysis, have been substantiated. The main scientific and practical problems have been identified, including data inconsistency, complexity of interpretation, the influence of variable operating modes, and limited adaptability of models. It has been proven that the use of an integrated approach improves the accuracy and reliability of technical condition assessment. **Conclusions.** It has been substantiated that the implementation of comprehensive diagnostic methods based on the integrated analysis of electrical and mechanical parameters increases the efficiency of maintenance and creates the basis for the transition to predictive maintenance of vehicles. Prospects for further research are associated with the development of intelligent adaptive models for integrating heterogeneous data, improving the robustness of diagnostic methods to noisy signals, and their implementation in real-time technical condition monitoring systems.

**Key words:** integrated diagnostics, sensor data, condition monitoring, predictive maintenance, correlation analysis.

**Вступ.** Актуальність теми дослідження зумовлена зростанням складності сучасних автомобільних систем, насамперед електронного й електричного обладнання, що визначає функціональну надійність транспортних засобів у процесі технічної експлуатації. Інтеграція бортових електронних систем управління, сенсорних мереж і діагностичних інтерфейсів потребує застосування більш точних та інформативних методів оцінювання технічного стану як окремих елементів, так і систем загалом. В умовах інтенсивної експлуатації транспортних засобів особливої ваги набуває своєчасне виявлення прихованих дефектів електричного обладнання та деградаційних процесів у деталях машин, що безпосередньо впливає на безпеку руху, економічність та екологічні показники. Водночас існуючі підходи до діагностики часто характеризуються фрагментарністю, орієнтацією на окремі вузли або використанням застарілих методів контролю, що не повною мірою враховують комплексний характер функціонування сучасних автомобілів.

**Постановка проблеми.** Проблема полягає у необхідності розроблення та наукового обґрунтування інтегрованих методів діагностики технічного стану автомобілів в умовах реальної експлуатації з урахуванням взаємозв'язку електричних, механічних і теплових процесів. Сучасні транспортні засоби характеризуються високим рівнем електронізації, що ускладнює виявлення відмов через їх латентний характер і взаємний вплив компонентів систем. Існуючі підходи до діагностики залишаються переважно локальними, орієнтованими на окремі вузли, що обмежує можливості комплексного оцінювання технічного стану та своєчасного виявлення деградаційних змін у деталях машин.

Наявна невідповідність між зростаючою складністю електричного обладнання автомобілів і рівнем розвитку діагностичних методів ускладнює формування достовірних критеріїв оцінювання працездатності. Це знижує ефективність технічного обслуговування, призводить до підвищення експлуатаційних витрат і ризиків відмов у процесі руху. У зв'язку із цим актуалізується потреба в удосконаленні методів збору й обробки діагностичної інформації, інтеграції даних різної фізичної природи та впровадженні інтелектуальних підходів до аналізу технічного стану, що має важливе значення для підвищення надійності транспортних засобів і забезпечення безпеки їх експлуатації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Огляд сучасних досліджень у сфері діагностики автомобілів в умовах технічної експлуатації засвідчує системний характер наукових підходів, що поєднують аналіз електричного обладнання та технічного стану механічних компонентів. О. В. Головіна та співавтори доводять, що якість діагностики електронних систем безпосередньо визначає ефективність подальшої технічної експлуатації автомобіля, формуючи передумови для зниження відмов та підвищення надійності [1]. В. В. Кривда та співавтори розширюють ці положення, акцентуючи увагу на необхідності обґрунтованості інженерних рішень у процесі технічного обслуговування, що забезпечує підвищення ефективності експлуатації транспортних засобів [2]. В. Нечипорук та С. Орищенко узагальнюють сучасні методи діагностики машин, підкреслюючи доцільність комплексного використання різнорідних параметрів стану технічних систем [3]. Т. М. Надич та співавтори обґрунтовують упровадження кіберфізичного підходу в систему технічного сервісу, що дає змогу інтегрувати діагностичні дані

й оптимізувати процеси обслуговування вантажних автомобілів [4]. С. Бурлака та співавтори аналізують моделі діагностики транспортних засобів, визначаючи їх здатність відображати технічний стан об'єктів на основі параметричного аналізу [5], обґрунтовують вибір діагностичних методів із урахуванням факторів, що впливають на довговічність деталей та залишковий ресурс [6]. О. Рибіцький та В. Голян акцентують увагу на використанні методів штучного інтелекту для інтелектуальної діагностики автомобілів, що забезпечує підвищення точності виявлення несправностей електричних систем [7].

Інший вектор наукових підходів пов'язаний із впровадженням методів моніторингу технічного стану на основі аналізу фізичних процесів у вузлах машин. І. Курич (I. Kuric) та співавтори досліджують діагностичні методи в енергетичних системах приводів, доводячи ефективність аналізу енергетичних параметрів як інформативних ознак технічного стану [8]. А. Чоудхарі (A. Choudhary) та співавтори узагальнюють сучасні технології діагностики несправностей електромобілів, підкреслюючи роль компонентного підходу до аналізу електричних систем [9]. С. К. Гундевар (S. K. Gundewar) і П. В. Кейн (P. V. Kane) розглядають методи контролю стану електродвигунів, акцентуючи увагу на використанні вібраційних та електричних параметрів для раннього виявлення дефектів [10]. Г. А. Хуссейн (G. A. Hussain) та співавтори досліджують методи діагностики часткових розрядів у високовольтному обладнанні, що має прикладне значення для оцінювання стану електричних систем транспортних засобів [11]. Р. Р. Кумар (R. R. Kumar) та співавтори узагальнюють як традиційні, так і інтелектуальні підходи до діагностики та моніторингу стану індукційних двигунів, підкреслюючи ефективність поєднання класичних методів із алгоритмами штучного інтелекту [12]. М. Х. Мохд Газалі (M. H. Mohd Ghazali) та В. Рахіман (W. Rahiman) доводять доцільність застосування вібраційного аналізу як універсального інструменту діагностики технічного стану машин, що забезпечує підвищення точності ідентифікації дефектів [13].

Попри розвиток сучасних підходів до діагностики автомобілів, залишається невирішеною проблема формування цілісної діагностичної картини технічного стану на основі узгодженого аналізу електричних і механічних параметрів. Існуючі методи здебільшого відображають окремі аспекти функціонування систем і не забезпечують достатньої глибини інтерпретації причин відмов, що зумовлено складністю інтеграції різномірних даних, їх динамічним характером та впливом експлуатаційних факторів.

Недостатня розробленість цих аспектів обмежує можливості переходу до достовірного прогнозування технічного стану, що визначає необхідність їх подальшого дослідження. У цьому контексті увага зосереджується на обґрунтуванні підходів до інтеграції діагностичних параметрів і формуванні методичної основи для підвищення ефективності діагностики, що безпосередньо спрямовано на досягнення мети дослідження.

**Мета і завдання статті.** Метою статті є розроблення та дослідження комплексних методів діагностики технічного стану автомобілів в умовах експлуатації на основі інтегрованого аналізу електричних і механічних параметрів.

Завдання статті:

1. Проаналізувати сучасні підходи до діагностики автомобілів та узагальнити інформативні електричні й механічні параметри.

2. Обґрунтувати принципи інтеграції різнорідних даних у комплексних методах діагностики та виявити проблеми їх застосування.

3. Розробити рекомендації щодо підвищення ефективності діагностики на основі інтегрованого аналізу параметрів.

**Виклад основного матеріалу.** Сучасні підходи до діагностики автомобілів формуються на основі інтеграції методів контролю електричних і механічних параметрів, що дає змогу забезпечити більш повне й достовірне оцінювання технічного стану транспортних засобів. Традиційні методи, орієнтовані на ізольований аналіз окремих вузлів, поступово заміщуються комплексними підходами, які враховують взаємозв'язок процесів у системах автомобіля. Значна увага приділяється використанню бортових діагностичних систем, сенсорних мереж та цифрових протоколів обміну даними, що забезпечують безперервний моніторинг параметрів функціонування. У цьому контексті доцільно розмежувати вбудоване діагностування, що реалізується за допомогою бортових систем самодіагностики (бортова діагностика, on-board diagnostics, OBD; уніфіковані діагностичні сервіси, Unified Diagnostic Services, UDS) і забезпечує контроль параметрів у режимі реального часу, та зовнішнє діагностування, яке здійснюється із застосуванням спеціалізованих діагностичних пристроїв і стендів у процесі технічного обслуговування та передбачає поглиблений аналіз технічного стану вузлів. У цьому контексті поєднання електричних показників (напруга, струм, сигнали датчиків) із механічними характеристиками (вібрація, знос, температурні режими) створює передумови для раннього виявлення відхилень і прогнозування технічного стану деталей машин (табл. 1).

Таблиця 1

**Сучасні підходи до діагностики автомобілів на основі електричних і механічних параметрів**

Підхід	Сутність	Діагностичні параметри	Практичне значення
Параметричний аналіз	Оцінювання стану за відхиленням контрольних параметрів	Напруга, струм, тиск, температура	Виявлення відхилень режимів роботи
Вібраційна діагностика	Аналіз коливальних процесів вузлів	Частота, амплітуда вібрацій	Виявлення зносу підшипників, передач
Термодіагностика	Контроль теплових режимів	Температура, теплові поля	Ідентифікація перегрівів і перевантажень
Електронна бортова діагностика	Використання вбудованих систем контролю	Коди несправностей, сигнали датчиків	Оперативне виявлення відмов
Акустична діагностика	Аналіз звукових сигналів	Рівень шуму, спектр	Раннє виявлення механічних дефектів
Комплексний підхід	Інтеграція різних методів	Сукупність електричних і механічних параметрів	Підвищення точності діагностики

*Джерело: сформовано автором на основі [1, с. 58; 3, с. 25; 5, с. 40; 7, с. 450; 9, р. 2328; 10, р. 650; 13].*

У практиці технічної експлуатації найбільш ефективним є поєднання наведених підходів. Наприклад, фіксація відхилень напруги в системі живлення сама по

собі не дозволяє встановити причину, однак у поєднанні з підвищеними вібраціями генератора дає підстави діагностувати механічний знос підшипників. Аналогічно локальний перегрів контактних з'єднань, виявлений термодіагностикою, часто корелює зі зростанням електричного опору та підтверджується параметричними вимірюваннями. У сервісній практиці це реалізується як послідовний або паралельний аналіз даних: бортова діагностика сигналізує про відхилення, а фізичні методи уточнюють джерело дефекту [5, с. 40; 7, с. 450]. Такий підхід дає змогу уникати помилкової заміни справних компонентів, скорочує час пошуку несправностей і забезпечує обґрунтоване планування ремонту, що є критичним для інтенсивної експлуатації транспортних засобів.

Інформативні діагностичні параметри електричного обладнання та технічного стану деталей машин формують основу об'єктивного оцінювання працездатності автомобіля в умовах експлуатації. Їх інформативність визначається чутливістю до деградаційних процесів, стабільністю вимірювання та здатністю відображати причинно-наслідкові зв'язки між електричними й механічними явищами. Електричні параметри характеризують функціональний стан систем керування і живлення, тоді як механічні показники відображають фізичний знос і зміну геометричних або динамічних властивостей деталей. Найбільш ефективним є використання параметрів, що змінюються на ранніх стадіях дефектоутворення та мають стійкий зв'язок із конкретними видами несправностей (табл. 2).

Таблиця 2

**Інформативні діагностичні параметри електричного обладнання та технічного стану деталей машин**

Група параметрів	Параметр	Характеристика	Діагностичне значення
Електричні	Напруга	Рівень електричного потенціалу в колах	Відображає стабільність живлення та наявність втрат
	Сила струму	Інтенсивність електричного потоку	Вказує на навантаження та можливі перевантаження
	Опір	Величина електричного опору елементів	Дає змогу виявити контактні дефекти та деградацію ізоляції
	Сигнали датчиків	Вихідні дані сенсорів	Характеризують режим роботи систем
Механічні	Вібрація	Коливальні процеси в деталях	Свідчить про знос, дисбаланс, дефекти підшипників
	Температура	Тепловий стан вузлів	Вказує на перевантаження або підвищене тертя
	Шум	Акустичні характеристики роботи	Дає змогу ідентифікувати початкові дефекти
	Зазори та люфти	Геометричні відхилення	Відображають ступінь зносу та порушення посадок

*Джерело: сформовано автором на основі [1, с. 59; 3, с. 27; 5, с. 41; 6, с. 174; 9, р. 2330; 10, р. 655; 11, р. 51385; 13].*

Практична значущість наведених параметрів визначається їх здатністю відображати фізичну природу деградаційних процесів і формувати стійкі діагностичні ознаки на ранніх стадіях відмов. Відповідно до положень ISO 13374-1:2003 [14], ефективна діагностика передбачає не лише фіксацію первинних сигналів,

а їх послідовну трансформацію у діагностичні індикатори через аналіз трендів, кореляцій і порогових відхилень. Це означає, що інформативність параметра зростає за умови його інтерпретації в системі взаємопов'язаних показників, а не ізольовано.

У реальних умовах експлуатації характерним є поєднання електричних і механічних змін, що формують комплексні ознаки несправностей. Наприклад, для електродвигунів систем допоміжного обладнання (вентилятори, паливні насоси) збільшення споживаного струму на 10–20 % за номінальної напруги, яке супроводжується підвищенням температури корпусу на 15–25 °С та зміщенням піків у спектрі вібрацій, свідчить про зростання механічного опору, найчастіше через знос підшипників або порушення мастильного режиму [15]. Ізольований контроль струму в такому випадку не дає можливості відокремити електричну причину від механічної, тоді як сумісний аналіз параметрів формує однозначну діагностичну інтерпретацію. Подібна закономірність спостерігається під час аналізу контактних з'єднань: локальне збільшення електричного опору навіть на десятки міліом призводить до інтенсивного тепловиділення, що фіксується термографічними методами у вигляді температурних аномалій, які перевищують фон на 10–30 °С. При цьому супутні коливання напруги та нестабільність сигналів датчиків дають змогу ідентифікувати не лише факт дефекту, а і його локалізацію. У практиці технічного обслуговування це використовується для запобігання відмовам електропроводки й електронних блоків керування, де механічні фактори (вібрації, послаблення з'єднань) безпосередньо впливають на електричні характеристики [9, р. 2330]. Важливим є також урахування швидкості зміни параметрів. Плавне зростання вібраційної амплітуди в поєднанні з незначним, але стабільним підвищенням температури свідчить про початкові стадії зносу, тоді як різкі стрибки електричних параметрів частіше вказують на порушення контактів або дефекти ізоляції. Такий підхід дає змогу формувати діагностичні моделі, орієнтовані на виявлення тенденцій, а не лише граничних станів, що відповідає сучасним вимогам до обслуговування за фактичним станом.

Обґрунтування принципів побудови комплексних методів діагностики базується на інтеграції різнорідних даних, що характеризують електричні та механічні процеси, з метою формування узгоджених діагностичних ознак. Ключовим є перехід від ізольованого аналізу параметрів до їх синхронізованої обробки та інтерпретації у межах єдиної діагностичної моделі, що підвищує точність і достовірність оцінювання технічного стану (табл. 3).

Взаємодія наведених принципів формує цілісну діагностичну модель, у якій дані різної природи переходять із рівня розрізнених сигналів у систему узгоджених ознак технічного стану. Отримання електричних параметрів через уніфіковані діагностичні сервіси (англ. Unified Diagnostic Services, UDS) відповідно до ISO 14229-1:2020 [16] забезпечує структурований доступ до інформації електронних блоків керування, однак їх інтерпретація набуває змісту лише в поєднанні з механічними та тепловими характеристиками. Саме інтеграція дає можливість перейти від фіксації відхилення до розуміння механізму його виникнення.

Таблиця 3

**Принципи побудови комплексних методів діагностики  
на основі інтеграції різномірних даних**

Принцип	Сутність	Реалізація	Практичне значення
Інтеграція даних	Об'єднання параметрів різної природи	Комбінування електричних, механічних і теплових сигналів	Підвищення повноти оцінювання стану
Часова синхронізація	Узгодження даних за часовими мітками	Синхронний збір сигналів з різних сенсорів	Забезпечення коректності аналізу процесів
Нормалізація	Приведення параметрів до єдиної шкали	Масштабування та фільтрація сигналів	Порівнюваність різних показників
Кореляційний аналіз	Виявлення взаємозв'язків між параметрами	Аналіз залежностей між струмом, температурою, вібрацією	Встановлення причинно-наслідкових зв'язків
Адаптивність	Урахування змін режимів роботи	Зміна порогових значень залежно від умов експлуатації	Зниження похибок діагностики
Ієрархічність	Багаторівнева структура аналізу	Розподіл на рівні сигналів, ознак і рішень	Підвищення точності інтерпретації

*Джерело: сформовано автором на основі [2, с. 13; 4, с. 318; 5, с. 41; 7, с. 452; 8; 9, р. 2332; 12].*

Показовим є випадок, коли відхилення у тривалості імпульсів керування виконавчими механізмами супроводжується незначними, але стійкими змінами вібраційного фону та температурного режиму. Ізольовано такі зміни можуть залишатися в межах допустимих значень і не трактуватися як несправність, проте їх синхронний прояв формує ознаку початкової стадії механічної деградації. У цьому випадку часове узгодження даних є визначальним, оскільки дає можливість відокремити закономірну реакцію системи від випадкових коливань сигналів. Не менш суттєвим є приведення параметрів до узгодженого вигляду, що робить можливим їх спільний аналіз і виявлення стійких залежностей. Встановлення кореляції між електричним навантаженням, тепловими ефектами та динамічними характеристиками дає змогу формувати діагностичні патерни, які не спостерігаються під час аналізу окремих параметрів [8]. Кількісне оцінювання тісноти та напрямку такого взаємозв'язку доцільно здійснювати за допомогою коефіцієнта кореляції Пірсона, що визначається як:

$$r_{\{xy\}} = \frac{(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{\sqrt{((\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2) \cdot (\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2))}}, \quad (1)$$

де  $x$  характеризує електричні параметри (сила струму, напруга), а  $y$  – механічні та теплові показники (вібрації, температура). Використання цього показника дає змогу перейти від простого фіксування відхилень до встановлення причинно-наслідкових зв'язків між процесами різної фізичної природи. Практична реалізація такого підходу може бути проілюстрована на прикладі діагностики електродвигуна допоміжних систем, для якого в процесі експлуатації зафіксовано зростання сили струму з 8,5 А до 10,2 А, підвищення температури корпусу із 45 °С до 62 °С та збільшення амплітуди вібрацій приблизно на 30 %. Розрахунок

коефіцієнта кореляції між струмом і вібрацією дав значення  $r_{xy} = 0,82$ , а між струмом і температурою –  $r_{xy} = 0,76$ , що свідчить про наявність стійкого взаємозв'язку між параметрами та дає змогу інтерпретувати відхилення як наслідок зростання механічного опору в підшипниковому вузлі. Наведений приклад підтверджує практичну доцільність використання кореляційного аналізу як інструменту інтегрованої діагностики.

Зокрема, стійке позитивне значення коефіцієнта кореляції ( $r_{xy} > 0,7$ ) між зростанням струму й амплітудою вібрацій свідчить про підвищення механічного опору в обертових вузлах, що є характерним для зносу підшипників або порушення мастильного режиму. Якщо аналогічна залежність одночасно спостерігається між струмом і температурою, це підтверджує енергетичну природу втрат і дає можливість виключити випадкові коливання навантаження. Натомість слабка або відсутня кореляція за наявності відхилень струму вказує на ймовірну електричну природу несправності (дефекти контактів, ізоляції або електронних компонентів). Практично це означає, що діагностичне рішення формується не за окремими параметрами, а за їх узгодженою динамікою: синхронне зростання електричних і механічних показників інтерпретується як прояв внутрішньої деградації вузла, тоді як асинхронні зміни сигналізують про локальні або випадкові порушення. Таким чином, кореляційний аналіз виступає інструментом інтеграції різнорідних даних, що забезпечує підвищення точності ідентифікації дефектів та створює основу для переходу до прогностичного оцінювання технічного стану. Наприклад, поєднання поступового зростання струму з несиметричними змінами вібраційного спектра вказує на локалізований дефект, що проявляється у вигляді часткової деградації окремих елементів вузла, тоді як рівномірне підвищення всіх параметрів частіше відповідає загальному перевантаженню системи. У термінах кореляційного аналізу це відображається у формуванні різних типів залежностей: для локалізованих дефектів характерна нестабільна або частотно-залежна кореляція між параметрами, тоді як у разі перевантаження спостерігається стійкий високий рівень прямої кореляції між струмом, температурою та вібрацією.

З урахуванням змінних умов експлуатації така модель потребує адаптації до режимів роботи, що дає можливість уникати хибних спрацювань у перехідних процесах і зберігати чутливість до реальних дефектів. Це досягається шляхом аналізу кореляцій у ковзних часових вікнах та врахування динаміки зміни коефіцієнта  $r_{xy}$ , що дає змогу відокремити короточасні флуктуації від стійких деградаційних тенденцій.

Узагальнення результатів на різних рівнях обробки формує обґрунтоване діагностичне рішення, у якому кожен параметр розглядається не ізольовано, а як елемент системи взаємопов'язаних ознак [9, р. 2332]. При цьому саме узгоджені зміни параметрів, підтверджені кореляційними залежностями, набувають статусу діагностичних індикаторів, тоді як одиничні відхилення без підтвердження зв'язків розглядаються як менш інформативні. Це забезпечує підвищення точності ідентифікації несправностей і створює передумови для переходу до прогнозування технічного стану, а не лише фіксації його порушень.

Застосування комплексних методів діагностики в умовах реальної експлуатації ускладнюється низкою взаємопов'язаних проблем, що виникають на етапах

отримання, інтеграції та інтерпретації даних. Однією з ключових є обмежена узгодженість інформації різної природи: електричні параметри, доступні через UDS відповідно до ISO 14229-1:2020 [16], відображають переважно функціональний стан електронних систем, тоді як механічні дефекти проявляються опосередковано, що ускладнює їх однозначну ідентифікацію. У підсумку однакові відхилення сигналів можуть відповідати різним причинам, що знижує достовірність діагностичних висновків.

Суттєвим обмеженням є динамічний характер експлуатаційних режимів, у межах яких параметри змінюються під впливом навантажень, температури та вібрацій, формуючи нестабільні та зашумлені сигнали. Це ускладнює виділення стійких діагностичних ознак і підвищує ризик хибних інтерпретацій [12]. Додатково виникає проблема часової неузгодженості даних із різних джерел, що спотворює причинно-наслідкові зв'язки між параметрами.

Водночас існуючі діагностичні моделі часто недостатньо адаптовані до змінних умов експлуатації, оскільки орієнтовані на стаціонарні режими або обмежені набори параметрів. Практичні труднощі посилюються обмеженим доступом до повної діагностичної інформації та необхідністю обробки великих обсягів даних у реальному часі, що призводить до використання спрощених алгоритмів [11, р. 51385]. Сукупність цих факторів обмежує ефективність комплексної діагностики і стримує впровадження підходів, орієнтованих на прогнозування технічного стану транспортних засобів.

Підвищення ефективності діагностики автомобілів на основі інтегрованого аналізу електричних і механічних параметрів доцільно забезпечувати через упровадження узгоджених підходів до збору, обробки та інтерпретації даних, орієнтованих на виявлення причинних зв'язків між параметрами. Насамперед доцільно забезпечити синхронізований збір електричних сигналів через UDS відповідно до ISO 14229-1:2020 [16] із механічними та тепловими показниками, що дає можливість формувати цілісну картину функціонування вузлів. Це усуває типову проблему роздільного аналізу, коли електричні відхилення не співвідносяться з фізичним станом деталей. Доцільним є застосування кореляційного аналізу параметрів у динаміці, що дає змогу переходити від фіксації відхилень до їх інтерпретації. Наприклад, одночасне зростання струму, температури та вібрацій повинно розглядатися як єдина діагностична ознака, а не як незалежні відхилення, що значно підвищує точність локалізації дефектів. Важливим є також використання трендових моделей, які враховують не лише граничні значення, а й швидкість зміни параметрів, що забезпечує виявлення ранніх стадій зносу.

Ефективність діагностики підвищується за умови адаптації порогових значень до реальних режимів експлуатації. Фіксовані нормативи не враховують варіативності навантажень, тому доцільно застосовувати адаптивні критерії оцінювання, що змінюються залежно від умов роботи системи. Паралельно необхідно забезпечити нормалізацію даних різної фізичної природи, що дає змогу здійснити їх коректне порівняння та використання у єдиній аналітичній моделі. Практично доцільним є впровадження багаторівневого аналізу, за якого первинні сигнали проходять етапи фільтрації, узагальнення й інтерпретації, що зменшує вплив шумів і випадкових відхилень. Це дає можливість формувати стійкі діагностичні

ознаки та знижує ризик помилкових рішень. Додатково необхідно забезпечити розширення доступу до діагностичних параметрів і підвищення їх інформативності шляхом комбінування даних бортових систем із зовнішніми вимірювальними засобами. Загалом підвищення ефективності діагностики досягається через системну інтеграцію різномірних параметрів, орієнтацію на їх взаємозв'язки та використання адаптивних і динамічних моделей аналізу, що забезпечує перехід від реактивного виявлення несправностей до прогнозування технічного стану транспортних засобів.

**Висновки.** За результатами дослідження встановлено, що підвищення ефективності діагностики автомобілів досягається завдяки інтеграції електричних і механічних параметрів та їх аналізу у взаємозв'язку, що дає змогу переходити від фіксації відхилень до виявлення механізмів дефектоутворення. Доведено, що найбільш інформативними є параметри, розглянуті в динаміці та кореляції, що забезпечує ранню ідентифікацію несправностей. Встановлено, що основними проблемами є неузгодженість різномірних даних, складність інтерпретації причинно-наслідкових зв'язків, вплив змінних режимів експлуатації на стабільність сигналів, а також обмежена адаптивність діагностичних моделей і доступ до даних. Це знижує точність діагностики й ускладнює її практичну реалізацію. Обґрунтовано доцільність впровадження синхронізованого збору даних, кореляційного та трендового аналізу, адаптивних критеріїв і багаторівневих моделей обробки, що забезпечує перехід до прогнозного обслуговування. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням інтелектуальних моделей інтеграції даних, підвищенням стійкості до зашумлення й адаптацією алгоритмів до умов реального часу.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Головіна О. В., Холодний Ю. Ф., Строков О. П., Жовтобрюх В. О. Дослідження впливу якості діагностики і ремонту електронних систем на подальшу технічну експлуатацію автомобіля. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2025. Т. 1, № 92, ч. 1. С. 57–62. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.7>.
2. Кривда В.В., Сакно О.П., Корніленко К.І., Чуйко С.П., Шумляківський В.П. Огляд підходів до підвищення надійності та ефективності технічної експлуатації автотранспорту з урахуванням обґрунтованості інженерних рішень. *Технічна інженерія*. 2025. Вип. № 1, № 95. С. 11–18. [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-11-18](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-11-18).
3. Нечипорук В., Орищенко С. Сучасні методи діагностики машин. *Техніка будівництва*. 2025. № 43. С. 23–35. <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0603>.
4. Надич Т.М., Аулін В.В., Гриньків А.В., Слонь В.В. Методи і заходи удосконалення системи технічного сервісу вантажних автомобілів на основі кіберфізичного підходу і розробки науково-технічної документації його операцій. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11, № 42, ч. II. С. 313–327. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.313-327](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.313-327).

5. Бурлака С., Митко М., Борисюк Д. Аналіз моделей діагностики для визначення технічного стану транспортних засобів. *Вісник Хмельницького національного університету*. Серія: Технічні науки. 2024. Т. 343, вип. 6, № 1. С. 39–42. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-5>.
6. Бурлака С.А., Митко М.В. Вибір діагностичних методів та аналіз чинників впливу на довговічність деталей транспортних засобів для забезпечення максимального залишкового ресурсу. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2025. Вип. 5. С. 172–178. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-182-5-172-178>.
7. Рибіцький О., Голян В. Інтелектуальна діагностика автомобілів з використанням штучного інтелекту. *Вісник Хмельницького національного університету*. Серія: Технічні науки. 2025. Т. 351, № 3.1. С. 448–454. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-56>.
8. Kuric I., Klačková I., Nikitin Y.R., Zajačko I., Cisar M., Tucki K. Analysis of diagnostic methods and energy of production systems drives. *Processes*. 2021. Vol. 9, № 5. Article 843. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9050843>.
9. Choudhary A., Fatima S., Panigrahi B. K. State-of-the-art technologies in fault diagnosis of electric vehicles: A component-based review. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2022. Vol. 9, № 2. P. 2324–2347. <https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3209166>.
10. Gundewar S.K., Kane P.V. Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2021. Vol. 9, № 4. P. 643–674. <https://doi.org/10.1007/s42417-020-00253-y>.
11. Hussain G.A., Hassan W., Mahmood F., Shafiq M., Rehman H., Kay J.A. Review on partial discharge diagnostic techniques for high voltage equipment in power systems. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 51382–51394. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3279355>.
12. Kumar R.R., Andriollo M., Cirrincione G., Cirrincione M., Tortella A. A comprehensive review of conventional and intelligence-based approaches for the fault diagnosis and condition monitoring of induction motors. *Energies*. 2022. Vol. 15, № 23. Article 8938. <https://doi.org/10.3390/en15238938>.
13. Mohd Ghazali M.H., Rahiman W. Vibration analysis for machine monitoring and diagnosis: A systematic review. *Shock and Vibration*. 2021. Vol. 2021. Article 9469318. <https://doi.org/10.1155/2021/9469318>.
14. ISO 13374-1:2003 – Condition monitoring and diagnostics of machines. *ISO: вебсайт*. 2026. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/21832.html>.
15. Bosch R. GmbH. Bosch Automotive Handbook. 10th ed. SAE International; Wiley. 2018. 1750 p. URL: <https://xpdf4u.com/reviews/A11RX6/998730/4991876-bosch-automotive-handbook-11th-edition> (дата звернення: 13.04.2026).
16. ISO 14229-1:2020 – Road vehicles – Unified diagnostic services (UDS). *ISO: вебсайт*. 2026. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/72439.html>.

## REFERENCES

1. Holovina, O.V., Kholodnyi, Yu.F., Stokov, O.P., & Zhovtobriukh, V.O. (2025). Doslidzhennia vplyvu yakosti diahnostryky i remontu elektronnykh system na podalshu tekhnichnu ekspluatatsiiu avtomobilia [Study of the influence of the quality of diagnostics and repair of electronic systems on further technical operation of the vehicle]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Bulletin of Kherson National Technical University*, 1(92, 1), 57–62. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.7>.
2. Krivda, V.V., Sakno, O.P., Kornilenko, K.I., Chuiko, S.P., & Shumliakivskiy, V.P. (2025). Ohliad pidkhodiv do pidvyshchennia nadiinosti ta efektyvnosti tekhnichnoi ekspluatatsii avtotransportu z urakhuvanniam obgruntovanosti inzhenernykh rishen [Review of approaches to improving reliability and efficiency of vehicle operation considering engineering decision justification]. *Tekhnichna inzheneriia – Technical Engineering*, 1(95), 11–18. [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-11-18](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-11-18).
3. Nechyporuk, V., & Oryshchenko, S. (2025). Suchasni metody diahnostryky mashyn [Modern methods of machine diagnostics]. *Tekhnika budivnytstva – Construction Engineering*, (43), 23–35. <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0603>.
4. Nadych, T.M., Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V., & Slon, V.V. (2025). Metody i zakhody udoskonalennia systemy tekhnichnoho servisu vantazhnykh avtomobiliv na osnovi kiberfizychnoho pidkhodu i rozrobky naukovotekhnichnoi dokumentatsii yoho operatsii [Methods and measures for improving the technical service system of trucks based on a cyber-physical approach]. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 11(42, II), 313–327. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.313-327](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.313-327).
5. Burlaka, S., Mytko, M., & Borysiuk, D. (2024). Analiz modelei diahnostryky dlia vyznachennia tekhnichnoho stanu transportnykh zasobiv [Analysis of diagnostic models for determining the technical condition of vehicles]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky – Bulletin of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences Series*, 343(6, 1), 39–42. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-5>.
6. Burlaka, S.A., & Mytko, M.V. (2025). Vybir diahnostrychnykh metodiv ta analiz chynnykiv vplyvu na dovhovichnist detalei transportnykh zasobiv dlia zabezpechennia maksimalnoho zalyshkovoho resursu [Selection of diagnostic methods and analysis of factors influencing durability of vehicle components]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, (5), 172–178. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-182-5-172-178>.
7. Rybitskyi, O., & Holian, V. (2025). Intelktualna diahnostryka avtomobiliv z vykorystanniam shtuchnoho intelektu [Intelligent vehicle diagnostics using artificial intelligence]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky – Bulletin of Khmelnytskyi National University*.

- Technical Sciences Series, 351(3.1), 448–454. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-56>.
8. Kuric, I., Klačková, I., Nikitin, Y. R., Zajačko, I., Císar, M., & Tucki, K. (2021). Analysis of diagnostic methods and energy of production systems drives. *Processes*, 9(5), 843. <https://doi.org/10.3390/pr9050843>.
  9. Choudhary, A., Fatima, S., & Panigrahi, B.K. (2022). State-of-the-art technologies in fault diagnosis of electric vehicles: A component-based review. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 9(2), 2324–2347. <https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3209166>.
  10. Gundewar, S.K., & Kane, P.V. (2021). Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 9(4), 643–674. <https://doi.org/10.1007/s42417-020-00253-y>.
  11. Hussain, G.A., Hassan, W., Mahmood, F., Shafiq, M., Rehman, H., & Kay, J.A. (2023). Review on partial discharge diagnostic techniques for high voltage equipment in power systems. *IEEE Access*, 11, 51382–51394. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3279355>.
  12. Kumar, R.R., Andriollo, M., Cirrincione, G., Cirrincione, M., & Tortella, A. (2022). A comprehensive review of conventional and intelligence-based approaches for the fault diagnosis and condition monitoring of induction motors. *Energies*, 15(23), 8938. <https://doi.org/10.3390/en15238938>.
  13. Mohd Ghazali, M.H., & Rahiman, W. (2021). Vibration analysis for machine monitoring and diagnosis: A systematic review. *Shock and Vibration*, 2021, 9469318. <https://doi.org/10.1155/2021/9469318>.
  14. ISO. (2003). ISO 13374-1: Condition monitoring and diagnostics of machines. ISO website. Retrived from: <https://www.iso.org/ru/standard/21832.html>.
  15. Bosch, R. GmbH. (2018). Bosch Automotive Handbook. 10th ed. SAE International; Wiley. Retrived from: <https://xpdf4u.com/reviews/A11RX6/998730/4991876-bosch-automotive-handbook-11th-edition>.
  16. ISO. (2020). ISO 14229-1: Road vehicles – Unified diagnostic services (UDS). ISO website. Retrived from: <https://www.iso.org/ru/standard/72439.html>.

Дата першого надходження статті до видання: 20.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 01.07.2026

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ПІДЗЕМНОГО СХОВИЩА ГАЗУ НА РІЗНИХ ЕТАПАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

О.Т. Чернова<sup>1</sup>, Г.М. Кривенко<sup>2</sup>, О.В. Кривенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> к.т.н., доцент, доцент кафедри транспортування та зберігання енергоносіїв,  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Івано-Франківськ, Україна  
ORCID ID: 0000-0002-6424-7569

<sup>2</sup> к.т.н., доцент, доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища  
та безпеки праці,  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Івано-Франківськ, Україна  
ORCID ID: 0000-0001-5188-3032

<sup>3</sup> аспірант кафедри транспортування та зберігання енергоносіїв,  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Івано-Франківськ, Україна  
ORCID ID: 0009-0008-7126-3701

### Анотація

**Вступ.** Підземні газосховища формують ефективну систему підземного зберігання газу, що є ключовим технологічним елементом існуючої газотранспортної системи країни та дає можливість вирішувати низку інженерно-технологічних завдань. У зв'язку з важливістю безперебійного та надійного функціонування таких сховищ актуальною залишається проблема контролю їхнього стану, визначення структурних особливостей активної зони та картування напрямків поширення високопроникних і застійних зон у межах резервуарного пласта. **Метою** є аналіз характеристик підземного сховища газу на різних етапах експлуатації (геолого-промислових параметрів пластової системи, змін об'ємної густини газу та фільтраційно-ємнісних властивостей пластової системи). **Результати.** Досліджено характер поведінки геолого-промислових параметрів пластової системи підземних сховищ газу та їх зміни у часі, які пов'язані зі зміною режимів експлуатації, за допомогою інформативного параметра об'ємної густини порід. Наведено методика розрахунку зміни об'ємної густини газу у випадку чисто газового режиму експлуатації газосховища. Проаналізовано зміну фільтраційно-ємнісних властивостей пластової системи у зв'язку із циклічною експлуатацією газосховища. Розглянуто питання об'ємної деформації глинистих порід покришок або глинистих пропластків у породах-колекторах через зміну напруженого стану в породах-колекторах, що впливає на зміну коефіцієнта пористості для глинистих порід унаслідок циклічної експлуатації підземних сховищ газу. Розглянуто вплив чинників на втрати газу підземних сховищах. **Висновки.** Наведені результати досліджень можуть використовуватися під час вирішення питань модернізації та експлуатації підземних сховищ газу. Це дасть змогу приймати рішення про внесення змін на різних етапах експлуатації для збереження природного газу.

**Ключові слова:** зміна густини газу, водонасичення газоносних пластів, об'ємна деформація, коефіцієнт пористості, втрати природного газу, чинники.

CHARACTERISTICS OF UNDERGROUND GAS STORAGE  
AT DIFFERENT STAGES OF OPERATION

O.T. Chernova<sup>1</sup>, G.M. Kryvenko<sup>2</sup>, O.V. Kryvenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Transportation and Storage of Energy Carriers,

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine*  
ORCID ID: 0000-0002-6424-7569

<sup>2</sup> PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Environmental Protection Technologies and Occupational Safety,

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine*  
ORCID ID: 0000-0001-5188-3032

<sup>3</sup> PhD Student at the Department of Transportation and Storage of Energy Carriers,

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine*  
ORCID ID: 0009-0008-7126-3701

**Summary**

**Introduction.** *Underground storage facilities of gas create a powerful underground gas storage system, which is an important technological link in the country's existing gas transportation system, capable of solving a number of issues. Given the importance of uninterrupted and effective operation of underground storage facilities, the problem of monitoring their condition, determining the structural features of the active zone and mapping the directions of extension of highly permeable and stagnant zones within the reservoir layer is relevant. **Purpose.** The purpose is to analyze the characteristics of underground gas storage at different stages of operation. To achieve the goal, the following research tasks were formulated: study of changes in gas density, water saturation of gas-bearing layers and compaction of clay rocks, which are caps, losses of natural gas in underground storages. **Results.** The nature of the behavior of geological and industrial parameters of the layer system of underground gas storages and their changes over time, which are associated with changes in operating modes, was studied using the informative parameter of rock bulk density. The method of calculating the change in gas bulk density in the case of a purely gas mode of operation of a gas storage facility is presented. The change in the filtration and capacity properties of the reservoir system in connection with the cyclic operation of a gas storage facility is analyzed. The issue of the volumetric deformation of clayey rocks of the caps or clayey interlayers in reservoir rocks is considered due to a change in the stress state in reservoir rocks, which affects the change in the porosity coefficient for clayey rocks due to the cyclic operation of underground gas storage facilities. The influence of factors on gas losses in underground storage facilities is considered. **Conclusions.** The results of this study can be used to support operational decisions for underground gas storage facilities, enabling informed adjustments at different stages of operation to optimize natural gas retention.*

**Key words:** *change in gas density, water saturation of gas-bearing reservoirs, volumetric deformation, porosity coefficient, natural gas losses, factors.*

**Вступ.** Газові підземні сховища – це стратегічний енергетичний ресурс, який дає можливість забезпечити енергетичну безпеку, стабільність постачань і захист від зовнішніх ризиків, підтримувати опалювальні сезони та зменшити залежність

від імпорту, а також відіграє важливу роль у європейській енергетичній системі. Незважаючи на складнощі, викликані військовими діями, Україна накопичила достатні запаси для опалювального сезону.

Частина газу також імпортується зі Східної Європи (Польщі, Угорщини, Словаччини та ін.), щоб підтримувати рівень запасів.

Слід зауважити, що підземні сховища газу (ПСГ) під час війни функціонують у стабільному режимі, забезпечуючи внутрішні потреби та зберігаючи європейські запаси, попри ризики обстрілів. Основні потужності (понад 12 млрд куб. м) зосереджені переважно на заході. Газова інфраструктура є більш стійкою за електричну, але потребує захисту.

**Постановка проблеми.** Без використання ПСГ важко уявити нормальне функціонування газотранспортної системи будь-якої країни. Підземні сховища залишаються захищеними, загальна система зберігання є стійкою, хоча наземні об'єкти зазнавали пошкоджень. ПСГ забезпечують балансування споживання, підтримання тиску в трубопроводі для надійного постачання в разі зниження температур та резерв на випадок аварій. Слід відмітити, що європейські компанії активно використовують українські сховища, закачуючи туди свої запаси газу (для зберігання), що свідчить про довіру до надійності системи. Під час війни газотранспортна система України зберігає гнучкість, що дає змогу оперативно вирішувати питання постачання в разі локальних пошкоджень, оскільки на цей час трубопроводна система споруджена з можливістю перекачування газу різними шляхами, змінюючи напрямки потоків. У випадку аварій чи пошкодження окремої ділянки транспортування не зупиняється, а транспортується резервними шляхами, продовжуючи постачання газу.

Отже, необхідно провести детальний аналіз, які чинники впливають на циклічну експлуатацію підземних сховищ газу. Це дасть змогу приймати рішення про внесення змін на різних етапах експлуатації для збереження природного газу.

**Актуальність дослідження та зв'язок авторського доробку з важливими науково-практичними завданнями.** З огляду на стратегічну роль підземних сховищ газу актуальним є завдання забезпечення їх безперебійної та ефективної експлуатації. У цьому контексті особливої уваги потребують питання контролю технічного й геологічного стану ПСГ, виявлення структурних особливостей активної зони та просторового оконтурювання зон із підвищеною проникністю й застійних ділянок у межах пластів-резервуарів. Розв'язання зазначених завдань можливе на основі аналізу динаміки геолого-промислових параметрів пластової системи ПСГ та їх часових змін, обумовлених варіаціями режимів експлуатації. Саме в цьому полягає практичне значення отриманих автором наукових результатів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вирішенням завдань, пов'язаних із впливом рівня зовнішнього навантаження на деформування порід і зміну їх деформаційних і ємніснофільтраційних властивостей, у різні роки займалися Савків Б. П., Гімер Р. Ф., Фик І. М., Федутенко А. М., Середюк М. Д. та інші [1; 2; 3]. У [4] наведено, що для різних амплітудних груп простежується певна залежність стабілізації росту об'ємних деформацій зі збільшенням кількості циклів зміни порового тиску. Дослідження геомеханічних процесів як фактор карбонізаційних перетворень наведено у [5]. Питанню зміни коефіцієнта пористості для

глинистих порід унаслідок циклічної експлуатації підземних сховищ газу присвячені роботи [6; 7]. У [8] обґрунтовано параметри зон зміцнення порід навколо виробок та критичної інфраструктури, запропоновано методи ін'єкційного закріплення, що дають можливість оптимізувати створення захисного екрану, знизити деформації та підвищити стійкість підземних споруд. З аналізу літературних джерел можна зробити висновок, що виникла потреба проаналізувати характеристики підземного сховища газу на різних етапах експлуатації, оскільки за зміни режимів роботи сховища відбувається зміна експлуатаційних параметрів.

**Метою** є аналіз характеристик підземного сховища газу на різних етапах експлуатації (геолого-промислових параметрів пластової системи, змін об'ємної густини газу та фільтраційно-ємнісних властивостей пластової системи). Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі задачі досліджень: дослідження зміни густини газу, водонасичення газонесних пластів та ущільнення глинистих порід, які є покришками, втрати природного газу в ПСГ.

Новизна полягає у комплексному дослідженні чинників, що впливають на циклічну експлуатацію підземних сховищ газу (режим роботи підземних сховищ газу, за якого газ регулярно закачується й відбирається протягом року або навіть кілька разів на рік, а не зберігається довго без руху). Результати наукової роботи дадуть змогу вчасно розробити заходи щодо запобігання виникнення потенційних загроз під час експлуатації підземних сховищ газу.

**Викладення основного матеріалу.** Дослідження динаміки геолого-промислових параметрів пластової системи підземних сховищ газу та їх часових змін, зумовлених варіаціями режимів експлуатації, здійснюється з використанням інформативного показника об'ємної густини гірських порід. Визначальною особливістю процесів, що відбуваються в ПСГ, є циклічний характер впливу операцій нагнітання та відбору газу на вміщуючі породи-колектори, причому швидкість цих процесів суттєво перевищує відповідні показники, характерні для природних газових родовищ.

Варто зазначити, що геолого-промислові параметри пластової системи ПСГ визначають природні та техногенні умови функціонування сховища й безпосередньо формують чинники, що впливають на його циклічну експлуатацію. Такі параметри, як колекторські властивості пласта, неоднорідність та тріщинуватість порового простору, пластовий тиск і температурні умови, водонасиченість та наявність газоводяних контактів, зумовлюють можливі режими закачування, зберігання та відбору газу. Отже, чинники циклічної експлуатації ПСГ є проявом впливу геолого-промислових параметрів на технологічні та експлуатаційні характеристики сховища.

Безпосереднє дослідження змін геолого-петрофізичних параметрів у підземних газосховищах потребує значних матеріальних витрат, у зв'язку із чим на практиці широко застосовуються непрямі методи аналізу. До таких методів належать розрахунки на основі даних багаторічних експлуатаційних спостережень за роботою газосховищ, лабораторні дослідження зразків порід-колекторів та їх аналогів в умовах, максимально наближених до пластових умов ПСГ, а також математичне моделювання фізичних процесів, що відбуваються в підземних газосховищах.

У разі експлуатації газосховища в чисто газовому режимі динамічні процеси, що відбуваються в газонасичених пластах підземного сховища газу, зумовлюють

зміну об'ємної густини газу, а отже, об'ємної густини газонасиченої породи. Визначальним чинником при цьому є варіація густини газу, спричинена його стисненням або розширенням у процесі циклічної експлуатації. Об'ємну густину газонасиченої породи  $\sigma_n$  можна визначити з використанням відомої петрофізичної залежності [4]:

$$\sigma_n = \sigma_{ск} \cdot (1 - K_n) + \sigma_g \cdot K_n, \quad (1)$$

де  $\sigma_{ск}$  – густина скелета породи;  $\sigma_g$  – густина газу;  $K_n$  – коефіцієнт абсолютної пористості.

Густина газу  $\sigma_g$  залежить від його хімічного складу та пластових умов і може бути з достатньою точністю визначена з використанням рівняння стану реального газу (узагальненого рівняння Клапейрона – Менделєєва):

$$p \cdot V = Z_r \cdot n \cdot R \cdot T, \quad (2)$$

де  $p$  – пластовий тиск, МПа;  $T$  – температура в пласті, К;  $V$  – об'єм газу, м<sup>3</sup>;  $Z_r = Z_r(p, T)$  – коефіцієнт стисливості газу;  $R$  – універсальна газова стала, Дж/(моль·К);  $n$  – кількість газу, моль.

$$n = \frac{m}{\mu}, \quad (3)$$

де  $m$  – маса газу;  $\mu$  – молярна маса.

Підставляючи співвідношення  $\sigma_g = m/V$  та (3) у (2), отримуємо для густини газу:

$$\sigma_g = \frac{p \cdot \mu}{Z_r \cdot R \cdot T}. \quad (4)$$

Зміна фільтраційно-ємнісних властивостей пластової системи є відомим наслідком циклічної експлуатації підземних сховищ газу. Порівняльний аналіз результатів лабораторних досліджень і чисельного моделювання показує, що найбільше зменшення пористості відбувається зі зростанням амплітуди порового тиску, при цьому порядок отриманих величин є узгодженим [4]. Для модельного зразка пісковика з початковою пористістю 42 %, амплітудою коливань порового тиску 5 МПа та кількістю циклів, що дорівнює шести, максимальне зниження пористості становило 0,2 %. При цьому з кожним наступним циклом спостерігається поступове зменшення коефіцієнта пористості (рис. 1). Аналіз експериментальних даних свідчить, що незалежно від початкового значення пористості її суттєве зниження відбувається до 7–8-го циклу навантаження. Подальша експлуатація практично не призводить до змін ємнісних параметрів пласта-колектора. З огляду на те що на Дашавському ПСГ на теперішній час виконано 27 повних циклів нагнітання та відбору газу із залученням усього порового об'єму відповідно до технологічного проекту циклічної експлуатації, зміну коефіцієнта пористості пластової системи можна вважати незначною та такою, що не чинить істотного впливу на загальну зміну геогустинних властивостей газонасичених пластів.

Насиченість порового простору флюїдом визначається як частка об'єму відповідного флюїду в загальному об'ємі пор, які він займає. За природних умов пористе середовище гірських порід повністю заповнене газовою та/або рідкою фазами. Природний газ у пластових умовах завжди перебуває у рівновазі з водяною парою, а газонасичені породи, крім газу, містять також зв'язану, а в окремих

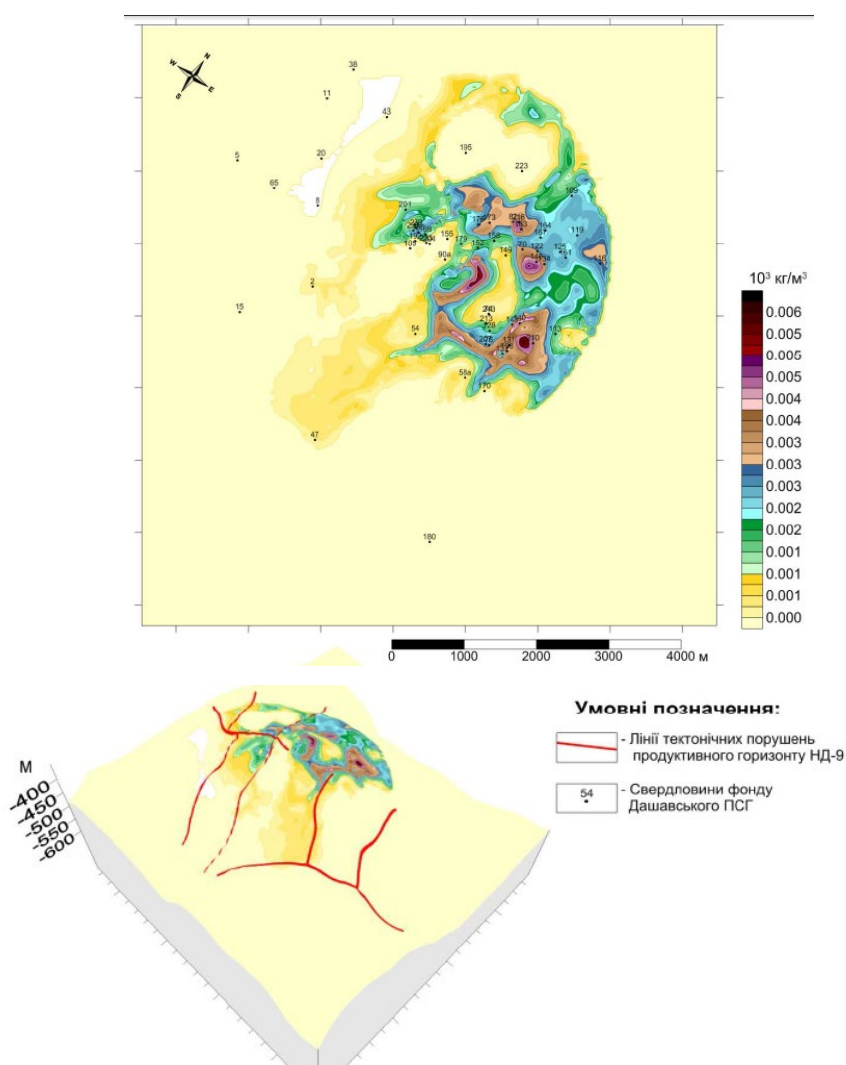


Рис. 1. Геостатистичний зріз у товщі продуктивного горизонту НД-8 нижньодашавської світи сарматського ярусу неогену

випадках і вільну воду. Вологість газу описується концентрацією води в паровій фазі системи «газ – вода» і зазвичай характеризується масовим відношенням водяної пари до сухого газу. За своєю фізичною природою процеси вологоутримання в природному газі є аналогічними до процесів, що відбуваються в повітрі. Кількість води, яка міститься в газі, визначається насамперед термобаричними умовами, зокрема тиском  $P$  та температурою  $T$ . Тривалий час вважалося, що вміст вологи не залежить від компонентного складу газу, а насичений водяною парою природний газ містить таку саму кількість води, як і повітря за ідентичних значень тиску та температури (табл. 1). Проте встановлено, що за низьких тисків ці відмінності є незначними, тоді як зі зростанням тиску розбіжності істотно збільшуються [9].

Таблиця 1

**Вміст води (у грамах) у 1 м<sup>3</sup> повітря, насиченого парами води за різних температури та тиску**

Темпе- ратура,	Тиск, МПа										
	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
0	4,9	0,98	0,49	0,327	0,254	0,2	0,16	0,14	0,12	0,11	0,098
5	6,8	1,36	0,68	0,453	0,34	0,27	0,23	0,2	0,17	0,15	0,136
10	9,4	1,88	0,94	0,627	0,47	0,38	0,31	0,27	0,24	0,21	0,188
15	12,9	2,58	1,29	0,86	0,65	0,52	0,43	0,37	0,32	0,29	0,258
20	17,4	3,48	1,74	1,16	0,87	0,7	0,58	0,5	0,44	0,39	0,348
25	23,1	4,62	2,31	1,54	1,16	0,92	0,77	0,66	0,58	0,51	0,462

Наявність у складі природного газу вуглекислого газу та сірководню сприяє підвищенню його вологості. Водночас присутність азоту, навпаки, зумовлює її зменшення, оскільки цей компонент знижує відхилення газової суміші від властивостей ідеального газу та характеризується меншою розчинністю у воді. Зі зростанням густини або середньої молекулярної маси газу, що обумовлено підвищенням вмісту важких вуглеводнів, вологість газу зменшується внаслідок взаємодії молекул цих компонентів з молекулами води. Додатковим чинником зниження вологості є наявність у пластових водах розчинених солей, які спричиняють зменшення парціального тиску водяної пари.

Під час експлуатації Дашавського підземного сховища газу разом із видобутим природним газом на поверхню виноситься певна кількість води, обсяги якої реєструються та відображаються у сезонних звітах про роботу ПСГ. Об'єм винесеної води доцільно характеризувати як відношення кількості відібраної води до об'єму відібраного газу. Середні сезонні значення вмісту води в газі, що відбирається, наведені на рисунку 2 [4, 6]. За нормальних умов максимальний внесок води в загальну об'ємну густину газу Дашавського ПСГ становить  $5,6 \cdot 10^{-4}$  кг/м<sup>3</sup>. Оскільки зі зростанням пластового тиску вологонасиченість газу зменшується, за термобаричних умов експлуатації Дашавського газосховища внесок води в загальну об'ємну густину газу буде ще нижчим і становитиме  $0,23 \cdot 10^{-4}$  кг/м<sup>3</sup>, що відповідає приблизно 0,12 % від сумарної зміни густини газу, зумовленої процесами експлуатації ПСГ.

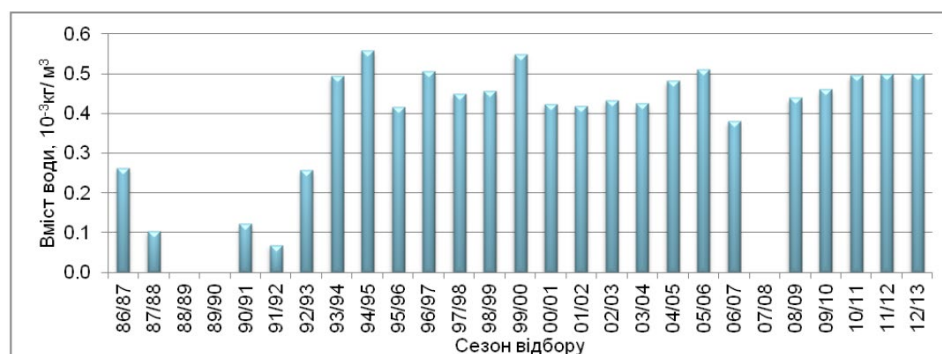


Рис. 2. Середній сезонний вміст води (у кілограмах) у 1 м<sup>3</sup> відібраного газу за нормальних умов (дані Дашавського ВУПЗГ)

Для пластової системи Дашавського підземного сховища газу характерний чисто газовий режим роботи, за якого вплив змін водонасичення газу на загальну зміну густини порід є мінімальним. У зв'язку із цим під час інтерпретації результатів гравітаційного моніторингу для умов Дашавського газового резервуара впливом коливань водонасичення можна знехтувати.

Відомо, що зміна напруженого стану в породах-колекторах спричиняє об'ємну деформацію глинистих покришок або глинистих прошарків у межах колекторських порід. Дослідженням змін коефіцієнта пористості глинистих порід за умов циклічної експлуатації підземних сховищ газу присвячено низку наукових робіт [6, 7]. Узагальнення їх результатів свідчить про відсутність суттєвих змін пористості глинистих покришок і прошарків за регулярного знакозмінного короткотривалого навантаження тривалістю 4–6 місяців. Такий часовий інтервал є недостатнім для прояву фільтраційних процесів флюїдів через малопроникні глинисті покришки, що дає змогу не враховувати ці ефекти в подальших оцінках.

Зв'язок між інформативним показником об'ємної густини гірських порід та об'ємною густиною газу й газонасиченої породи має фізичний та структурно-функціональний характер.

Інформативний показник об'ємної густини гірських порід відображає інтегральні властивості середовища – співвідношення твердої фази та порового простору, ступінь пористості та характер флюїдонасичення. Таким чином, він є узагальненою характеристикою структурного стану породи та її фізичних параметрів.

Об'ємна густина газонасиченої породи формується як результат сумарного внеску мінеральної матриці та флюїдів, що заповнюють поровий простір. За наявності газу густина породи зменшується порівняно з водонасиченим або повністю мінеральним станом, оскільки густина газу суттєво менша за густину рідин і твердої фази. Саме ця різниця і зумовлює зміну інтегрального показника густини.

Отже, інформативний показник об'ємної густини гірських порід виступає базовою фізичною характеристикою середовища, тоді як об'ємна густина газу визначає величину відхилення сумарної густини породи від її фонового (негазонасиченого) стану. Об'ємна густина газонасиченої породи є похідною величиною, що відображає взаємодію структурних параметрів породи та фізичних властивостей флюїду.

Таким чином, між зазначеними параметрами існує прямий фізичний зв'язок: структурний стан породи визначає чутливість її густини до присутності газу, а властивості газу формують величину цієї зміни.

Слід зазначити, що зарубіжний та вітчизняний досвід підземного зберігання газу підтверджує можливість експлуатації свердловин з міжколонними тисками до 2 МПа та витіканням газу до 100 м<sup>3</sup>/добу, тобто витікання газу є планово-передбачуваними [10].

Втрати газу в межах пласта-об'єкта зберігання обумовлені поступовим насиченням малопроникних зон, процесами дифузії та сорбції газу, його розчиненням у воді під час зберігання у водоносному горизонті, а також защемленням газу за поступового заводнення пласта. За оцінками зарубіжних і вітчизняних авторів, такі втрати не перевищують 1–1,5 % активного об'єму за цикл [11; 12].

До внутрішньопластових втрат слід віднести і 9,1 млрд м<sup>3</sup> залишкового буферного об'єму газу, який на цей час замінити немає чим.

Отже, для безпечної експлуатації підземних сховищ газу потрібно проводити аналіз характеристик на різних етапах їх експлуатації.

**Висновки.** Досліджено характер поведінки геолого-промислових параметрів пластової системи підземних сховищ газу та їх зміни в часі, які пов'язані зі зміною режимів експлуатації, за допомогою інформативного параметра об'ємної густини порід. Наведено методику розрахунку зміни об'ємної густини газу у випадку чисто газового режиму експлуатації газосховища. Проаналізовано зміну фільтраційно-емнісних властивостей пластової системи у зв'язку із циклічною експлуатацією газосховища. Розглянуто питання об'ємної деформації глинистих порід покришок або глинистих пропластків у породах-колекторах через зміну напруженого стану в породах-колекторах, що впливає на зміну коефіцієнта пористості для глинистих порід унаслідок циклічної експлуатації підземних сховищ газу. Розглянуто вплив чинників на втрати газу підземних сховищах. Наведені результати досліджень можуть використовуватися під час вирішення питань експлуатації підземних сховищ газу. Це дасть змогу приймати рішення про внесення змін на різних етапах експлуатації для збереження природного газу.

За результатами аналізу чинників, що впливають на циклічну експлуатацію ПСГ, можливе внесення змін у режими закачування, зберігання та відбору природного газу, зокрема коригування темпів і обсягів закачування, граничних значень пластового тиску, тривалості експлуатаційних циклів, обсягів активного та буферного газу, а також режимів роботи свердловин і кінцевих параметрів відбору, що дає змогу зменшити втрати газу, запобігти обводненню та забезпечити підвищення ефективності й надійності експлуатації ПСГ.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Савків Б. П. Підземне зберігання газу в Україні. Київ : Кий, 2008. 240 с.
2. Орлов О. О., Фик І. М. та ін. Бітумонафтогазогеологічне районування, нафтові і газові родовища та підземні сховища газу України : монографія. Івано-Франківськ : Симфонія форте. 2015. 540 с.
3. Федутенко А. М. Проблеми та перспективи розвитку підземного зберігання газу в Україні. *Науковий вісник. Стан і перспективи підземного зберігання газу в Україні*. 2004. № 2 (8). С. 9–14.
4. Петровський О. П., Федченко Т. О., Трачук А. Ю. Геогустинні характеристики пластової системи підземного сховища газу на різних етапах експлуатації (на прикладі Дашавського підземного резервуару). *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2014. № 3 (52). С. 79–86.
5. Bulat A., Krukovskiy O., Bulich Yu., Bezruchko K., Burchak O. Geomechanics as a factor of carbonification transformations at various hierarchical and scale levels. *Геотехнічна механіка*. 2024. Вип.170. С. 156–164.
6. Гімер Р. Ф., Савків Б. П. Технологічні особливості створення ПСГ України. *Розвідка і розробка. Серія «Транспорт і зберігання газу»*. Івано-Франківськ, 1998. С. 15–34.

7. Чернова О.Т. Аналіз розвитку мережі підземних сховищ газу України. *Розробка родовищ : зб. наук. пр.* 2014. Т. 8. С. 261–276.
8. Slashchov I., Slashchova O., Seleznov A., Shmyglov V., Kryvenko Ye., Brizheniuk V. Justification of the parameters of injection rock hardening zones around mining workings and buried structures of critical infrastructure. *Геотехнічна механіка*. 2024. Вип. 170. С. 165–180.
9. Гімер Р. Ф., Гімер П. Р., Деркач М. П. Підземне зберігання газу. Львів : Центр Європи. 2007. 224 с.
10. Чернова О.Т. Технологічні особливості експлуатації підземних сховищ газу. *VI Міжнародна конференція «Актуальні проблеми розвитку світової науки»*. С. 80–86.
11. Ярошенко О. Л. Сталій розвиток підприємств підземного зберігання газу: шляхи досягнення. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2016. № 2. С. 91–96.
12. Chernova O., Vutyaz O., Martyniuk R., Fedorovych I. Rational methods of operation of underground gas storages and mitigation of energy losses. *Nafta-Gaz*. 2022. No. 3. P. 187–196. DOI: 10.18668/NG.2022.03.03.

#### REFERENCES

1. Savkiv, B.P. (2008). Underground gas storage in Ukraine [Pidzemne zberihannya hazu v Ukraini]. Kyiv: Kiy. 240 p. [in Ukrainian].
2. Orlov, O.O., Fyk, I.M., et al. (2015). Bitumen-oil-gas-geological zoning, oil and gas fields, and underground gas storage in Ukraine: Monograph. [Bitumonaftohazogeologichne raionuvannya, naftovi i hazovi rodovyshcha ta pidzemni skhovyshcha hazu Ukrainy]. Ivano-Frankivsk: Symphony Forte. 540 p. [in Ukrainian].
3. Fedutenko, A.M. (2004). Problems and prospects of underground gas storage development in Ukraine [Problemy ta perspektyvy rozvytku pidzemnoho zberihannya hazu v Ukraini]. *Scientific Bulletin. Status and prospects of underground gas storage in Ukraine*, 2(8), 9–14 [in Ukrainian].
4. Petrovskiy, O.P., Fedchenko, T.O., & Trachuk, A.Yu. (2014). Geodensity characteristics of an underground gas storage reservoir at different stages of operation (a case study of the Dashava underground reservoir) [Heohustynni kharakterystyky plastovoi systemy pidzemnoho skhovyshcha hazu na riznykh etapakh ekspluatatsii (na prykladi Dashavskoho pidzemnoho rezervuaru)]. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*, 3(52), 79–86 [in Ukrainian].
5. Bulat A., Krukovskiy O., Bulich Yu., Bezruchko K., & Burchak, O. (2024). Geomechanics as a factor of carbonification transformations at various hierarchical and scale levels. *Geotechnical Mechanics*, 170, 156–164.
6. Himer, R.F., & Savkiv, B.P. (1998). Technological features of the creation of underground storage facilities in Ukraine [Tekhnologichni osoblyvosti stvorennia PSG Ukrainy]. *Exploration and Development. Series "Transport and Storage of Gas"*. Ivano-Frankivsk. 15–34 [in Ukrainian].

7. Chernova, O.T. (2014). Analysis of the development of underground gas storage network in Ukraine [Analiz rozvytku merezhi pidzemnykh skhovyshch hazu Ukrainy]. *Field Development*, 8, 261–276 [in Ukrainian].
8. Slashchov, I., Slashchova, O., Seleznov, A., Shmyglov, V., Kryvenko, Ye., & Brizheniuk, V. (2024). Justification of the parameters of injection rock hardening zones around mining workings and buried structures of critical infrastructure. *Geotechnical Mechanics*, 170, 165–180.
9. Himer, R.F., Himer, P.R., & Derkach, M.P. (2007). Underground gas storage. Lviv: Center of Europe. 224 [in Ukrainian].
10. Chernova, O. T. (2020). Technological features of underground gas storage operation [Tekhnolohichni osoblyvosti ekspluatatsii pidzemnykh skhovyshch hazu]. *VI International Conference “Actual Problems of World Science Development”* (pp. 80–86) [in Ukrainian].
11. Yaroshenko, O.L. (2016) Sustainable development of underground gas storage enterprises: ways to achieve it [Stalyi rozvytok pidpriemstv pidzemnoho zberihannia hazu: Shliakhy dosiahnennia]. *Scientific Bulletin of the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*, 2, 91–96 [in Ukrainian].
12. Chernova, O., Vytyaz, O., Martyniuk, R., & Fedorovych, I. (2022). Rational methods of operation of underground gas storages and mitigation of energy losses. *Nafta-Gaz*, (3), 187–196. <https://doi.org/10.18668/NG.2022.03.03>.

Дата першого надходження статті до видання: 10.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 01.07.2026

Наукове видання

## РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

Випуск 2(29), 2026

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. 10,73.  
Замов. № 0726/642. Наклад 200 прим.  
Дата розміщення онлайн – 01.07.2026 р.  
Дата друку – 07.07.2026 р.

---

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»  
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1  
Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08  
E-mail: [mailbox@helvetica.ua](mailto:mailbox@helvetica.ua)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.

Scientific publication

# TRANSPORT DEVELOPMENT

**Scientific journal**

**Issue 2(29), 2026**

Founded by Odesa National Maritime University

*In Ukrainian and English*

Since October 2016

Format 70×108/16. Times New Roman Font.  
Offset. Digital printing. Conventional printed sheet 10,73.  
Order No 0726/642. Edition of 200 copies.  
Date posted online – 01.07.2026  
Date printed – 07.07.2026

---

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